DESARROLLO INFANTIL
Cómo adquieren los bebés el lenguaje

NANOTECNOLOGÍA
Detección rápida de infecciones

ARQUEOLOGÍA
Una pirámide que cambió la civilización

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

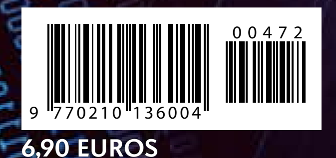
40 ANIVERSARIO 1976 - 2016

Enero 2016 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de Scientific American

Secretos cuánticos

Hacia una criptografía completamente segura



6,90 EUROS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
CRIPTOGRAFÍA CUÁNTICA | EL LENGUAJE DE LOS BEBÉS | NANODETECTORES DE INFECCIONES
ENERO 2016 N.º 472

ciclo de
conferencias y debates en

ciencias

8.ª edición

FUNDACIÓN RAMÓN ARECES

Por octavo año consecutivo, la Fundación Ramón Areces y Nature Publishing Group Iberoamérica, unidos con el objetivo de impulsar la divulgación científica, organizan conjuntamente un ciclo de conferencias y debates en ciencias, abordando cuestiones de actualidad y trasladando a la sociedad innovadores temas científicos y los avances más importantes en estas áreas, tratadas por grandes expertos internacionales.

Con esta iniciativa, la Fundación Ramón Areces y Nature Publishing Group Iberoamérica no pretenden crear únicamente unas jornadas de debate científico o médico, sino generar una reflexión colectiva sobre materias en las que entran en juego valores éticos que afectan a toda la sociedad. De esta manera, se pretende presentar estos avances científicos, interpretándolos y traduciéndolos desde la perspectiva de los beneficios y las ventajas que pueden suponer para el bienestar y la calidad de vida de la sociedad, pero también de sus posibles riesgos e inconvenientes, destacando e incidiendo en la importancia de la investigación en su progreso.

Síndrome de Down

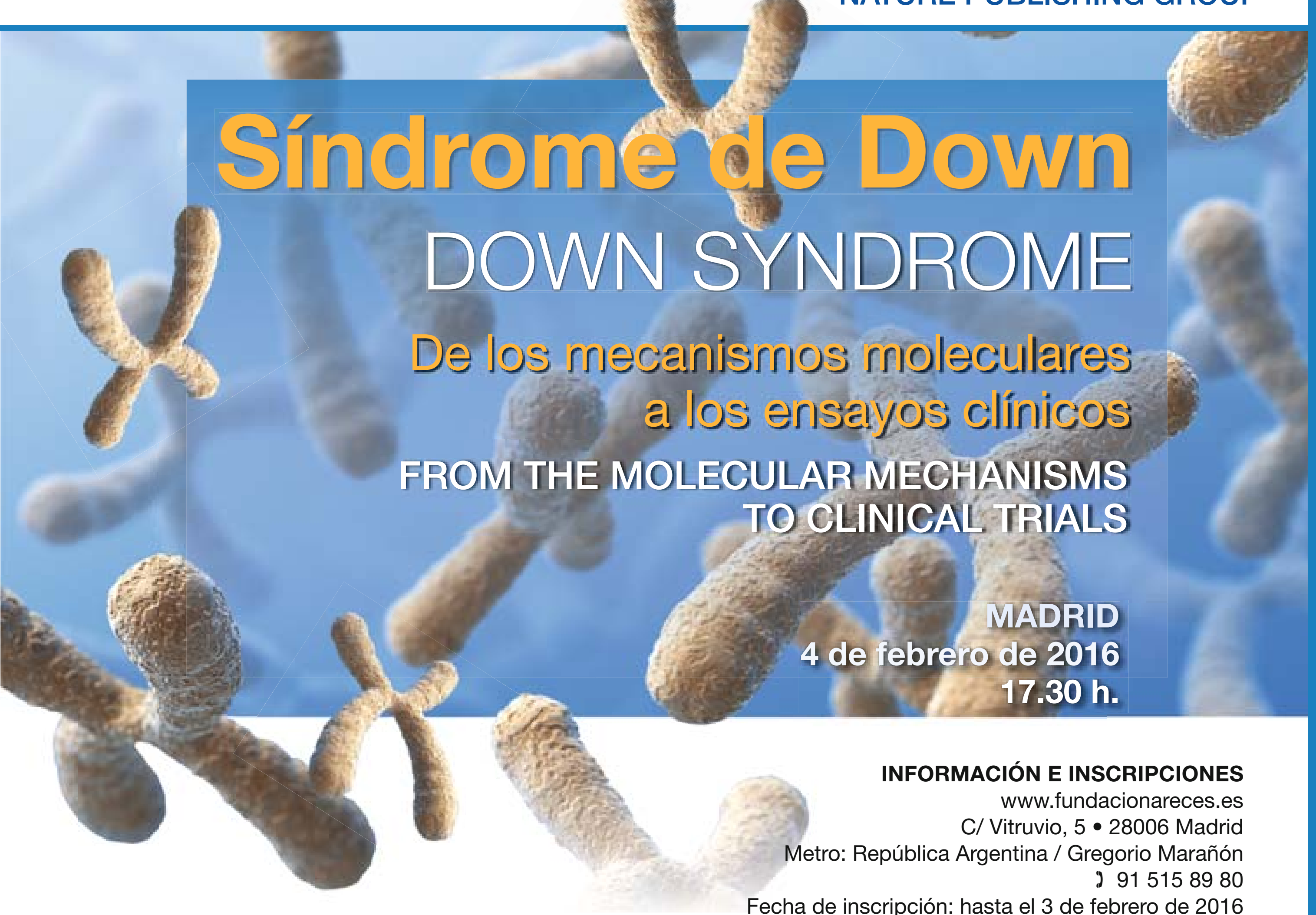
DE LOS MECANISMOS CELULARES A LOS ENSAYOS CLÍNICOS



El síndrome de Down es una alteración genética originada por una copia extra del cromosoma 21 o un fragmento de este. Se trata de la alteración cromosómica viable más frecuente en los humanos, que en España afecta a más de 30.000 personas, aproximadamente uno de cada 750 nacimientos.

Aunque no se ha desarrollado ninguna cura para el síndrome de Down, recientes estudios trabajan en el conocimiento de los mecanismos que originan los síntomas y cómo identificar los genes que producen una cantidad anómala de proteínas. El resultado de estos estudios podría proporcionar información sobre las rutas y procesos celulares involucrados en el trastorno, y permitiría albergar esperanzas sobre futuros tratamientos que paliaran al menos algunos de los síntomas.

FUNDACIÓN RAMÓN ARECES
NATURE PUBLISHING GROUP



Síndrome de Down

DOWN SYNDROME

De los mecanismos moleculares a los ensayos clínicos

FROM THE MOLECULAR MECHANISMS TO CLINICAL TRIALS

MADRID
4 de febrero de 2016
17.30 h.

INFORMACIÓN E INSCRIPCIONES
www.fundacionareces.es
C/ Vitruvio, 5 • 28006 Madrid
Metro: República Argentina / Gregorio Marañón
91 515 89 80
Fecha de inscripción: hasta el 3 de febrero de 2016

Intervenciones

Moderador
Juan Carlos López
Ex-editor de *Nature Medicine*, Nueva York (EE. UU.)

Modelos animales y estudios básicos
Victor Tybulewicz
Investigador principal en el Francis Crick Institute, Mil Hill, Londres (Reino Unido)

Descubrimiento de nuevos fármacos
Anirvan Ghosh
Jefe de investigación en farmacología para el sistema nervioso central. Roche, Basilea (Suiza)

Ensayos clínicos y mecanismos básicos
Alberto Costa
Investigador del departamento de pediatría en la Facultad de Medicina de la Universidad Case Western Reserve, Cleveland, Ohio (EE. UU.)

Mecanismos moleculares del aprendizaje en relación al síndrome de Down
Mara Dierssen
Directora de investigación en el Centro de Regulación Genómica de Barcelona y presidenta de la Sociedad Española de Neurociencia

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Enero 2016, Número 472

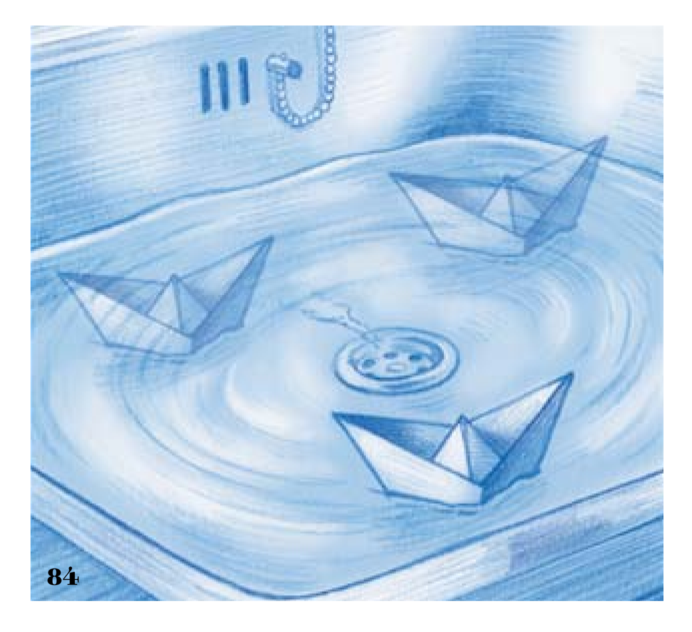
52

ARTÍCULOS




42


50


84

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES



¿Es posible cifrar mensajes secretos de forma completamente segura? En los últimos años, varios avances en el tratamiento cuántico de la información han demostrado que la privacidad perfecta puede lograrse incluso cuando un espía manipule los dispositivos de cifrado. Los resultados permiten apreciar desde otro punto de vista las extrañas propiedades del mundo cuántico. Ilustración de Danil Melekhin/iStockPhoto.

redaccion@investigacionyciencia.es



Noviembre 2015

MÁS SOBRE LA BELLA DURMIENTE

Respecto al problema de la bella durmiente propuesto por Alejandro Pérez Carballo en la sección «Juegos matemáticos» [Investigación y Ciencia, octubre de 2015], creo que ambas soluciones son correctas. Todo depende del observador.

Para el investigador externo que conoce la sucesión temporal, con un despertar seguro el lunes y uno probable al 50 por ciento el martes, la probabilidad el evento «cara» es 1/2. Este es el observador omnisciente. Pero el sujeto que participa en el experimento no tiene consciencia temporal al despertar, y solo cuenta con que la probabilidad de ser despertado el lunes es el doble que la del martes. Si esta última es x y la anterior es $2x$, dado que la probabilidad total es 1, se deduce que $x = 1/3$.

José Manuel Velarde Gestera
Sevilla

Responde Pérez Carballo: *Antes del lanzamiento de la moneda, el investigador y el participante están de acuerdo: la probabilidad del evento «cara» es 1/2. El lunes, al despertar al sujeto por primera vez, el investigador debería seguir asignando a dicho evento una probabilidad de 1/2.*

El lector sugiere que, dado que el participante ha perdido la noción del tiempo, debería otorgar al evento «cara» una probabilidad de 1/3. Esta es, sin duda, la respuesta que parece más razonable. Sin embargo, la pregunta es: ¿dónde se encuentra el error en el razonamiento que sugiere que, el lunes, el sujeto debería asignar a dicho suceso una probabilidad de 1/2? El lunes por la mañana el participante no ha aprendido nada nuevo: ya el domingo sabía que iban a despertarle, y sabía también que cuando eso ocurriese habría perdido la noción del tiempo. Si los indicios de los que dispone el lunes requieren que asigne al evento «cara» una probabilidad de 1/3, y si ya contaba con esos mismos indicios el domingo, ¿por qué no asignar al suceso una probabilidad de 1/3 el domingo?

EINSTEIN, LORENTZ Y POINCARÉ

En «Einstein, Lorentz, Eddington, Weyl y la relatividad general» [Investigación y Ciencia, noviembre de 2015], José Manuel Sánchez Ron comienza explicando los orígenes de la relatividad especial y recordando los trabajos de Hendrik A. Lorentz. Sin embargo, me ha sorprendido que el artículo no cite también a Henri Poincaré. Entre 1902 y 1905, Poincaré publicó dos trabajos que se anticiparon al primer artículo de Einstein sobre la relatividad especial, así como el resumen de un tercero. En esos tres documentos ya estaban expuestas las principales ideas de la relatividad especial.

Poincaré retomó el principio de movimiento relativo (de Galileo), que él mismo denominó «principio de relatividad», renunciando así a la idea de éter. Defendió que el tiempo y el espacio no eran absolutos, que la velocidad de la luz era un límite insuperable y conectó el principio de relatividad con las fórmulas de transformación de Lorentz en su tercer trabajo, cuyo resumen se publicó el 9 de junio de 1905.

La prioridad de Poincaré sobre Einstein fue reconocida por Max Born, amigo de Einstein desde 1916, en su libro *Einstein's theory of relativity* (1962): «Poincaré fue un paso más allá. Para él estaba bastante claro que el punto de vista de Lorentz era insostenible y que la equivalencia matemática de sistemas de referencia implicaba la validez del principio de relatividad. También era bastante consciente de las consecuencias de esta teoría». Y aunque Einstein no citó a Poincaré en su artículo de 1905, la correspondencia que mantuvo con Maurice Solovine revela que el famoso científico sí había estudiado el trabajo de Poincaré junto con el grupo de eruditos conocido como Academia Olimpia, entre los cuales se encontraba Solovine (*Albert Einstein – Lettres à Maurice Solovine*, 1956).

Carlos Moreu

Responde Sánchez Ron: *Mi artículo trata de la recepción temprana de la teoría de la relatividad general, a cuya elaboración Einstein se dedicó plenamente a partir de 1911-12 y la cual completó en noviembre de 1915. Poincaré había fallecido en 1912 y, por tanto, no pudo participar en modo alguno en tal recepción. La mención a Lorentz y su relación con la relatividad especial constituye una forma de introducir su importante papel en la recepción de la relatividad general, el tema de mi artículo. Digo, efectivamente, que «Lorentz estuvo muy cerca de ser el creador de la relatividad especial» —así fue— para recalcar su relación con el mundo relativista.*

Hablar de Poincaré no tendría sentido en semejante contexto. Hacer lo que el lector reclama sería objeto de otro artículo, en mi opinión, mucho menos interesante, pues lo que dice con respecto a Poincaré y la relatividad especial es de sobra conocido desde hace décadas. Por consiguiente, no debería causar sorpresa.

Errata corrige

En el artículo **Hacia una acuicultura más sostenible** [por Erik Vance; Investigación y Ciencia, junio de 2015], en la página 24 se indica una cifra errónea de habitantes chinos: 14.000 millones, en lugar de 1400 millones. Agradecemos a nuestro lector Marcelo habernos advertido del error.

En **Planeta disco duro** [por César Hidalgo; Investigación y Ciencia, octubre de 2015] se afirma en la página 63 que «el disco duro de la Tierra está más lleno hoy que ayer o hace un billón de años». Se trata de una traducción incorrecta del término *billion*, que en castellano equivale a mil millones.

Estos errores han sido corregidos en las ediciones digitales de los artículos correspondientes.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Apuntes



MEDIOAMBIENTE

El exterminador de estrellas de mar

Un robot cargado de veneno da caza a los equinodermos que están destruyendo el arrecife coralino más célebre del mundo

La Gran Barrera de Coral contará con un protector robótico desde principios de este invierno. El vehículo autónomo subacuático está programado para patrullar esa gran muralla viviente en busca de la destructiva corona de espinas (cuyas siglas en inglés son COTS), a la que mata con una inyección letal. Esta estrella de mar devora los pólipos de coral; aunque es autóctona del arrecife, su población ha experimentado un crecimiento desaforado en los últimos años, posiblemente por la sobrepesca de sus depredadores naturales. El último informe de la administración del Parque Marino de la Gran Barrera de Coral califica a este invertebrado como una amenaza equiparable al cambio climático o la actividad humana para el arrecife, que ha perdido la mitad de su masa coralina entre 1985 y 2012.

COTSbot, concebido por expertos en robótica de la Universidad Politécnica de Queensland en Australia, podría frenar la invasión de las estrellas. Dotado de inteligencia artificial, en las pruebas de laboratorio ha sabido reconocer su objetivo con un 99,4 por ciento de precisión. «Es tan bueno que no se deja engañar ni por los señuelos artificiales que introducimos; solo ataca a las estrellas vivas», asegura Matthew Dunbabin. Una flotilla de COTSbots podría ser un refuerzo decisivo para los buceadores que extraen o envenenan las estrellas a mano y, además, podría operar con mal tiempo o en corrientes fuertes. También serían útiles por la noche, cuando las estrellas son más activas y las inmersiones están prohibidas.

—*John R. Platt*

CÓMO FUNCIONA

1. El COTSbot sigue un derrotero programado, recorriendo de aquí para allá la Gran Barrera impulsado por sus cinco hélices. El robot navega muy cerca de los arrecifes, sin llegar a chocar con su delicada estructura, gracias a un sonar y diversas cámaras.
2. Las cámaras rastrean el entorno en busca de estrellas, distinguibles por sus tonos violáceos, los brazos espinosos y el movimiento deslizante. Los equinodermos a menudo repliegan los brazos y se ocultan bajo los salientes de coral, pero el *software* del robot ha sido programado para reconocer este tipo de posturas.
3. Cuando descubre una corona de espinas, despliega el brazo neumático equipado con una aguja y le inyecta 10 mililitros de sales biliares venenosas. El compuesto digiere el equinodermo desde dentro.
4. La estrella envenenada muere en 24 horas sin oportunidad de escisión ni regeneración (una táctica de supervivencia que es una bendición para la estrella pero un quebradero de cabeza para todo aquel que intenta contener su proliferación).
5. Los depósitos del vehículo albergan veneno suficiente para matar más de 200 estrellas en una patrulla de cuatro a ocho horas. La rapidez es crucial porque una sola estrella llega a engendrar millones de larvas.

CORTESÍA DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE QUEENSLAND

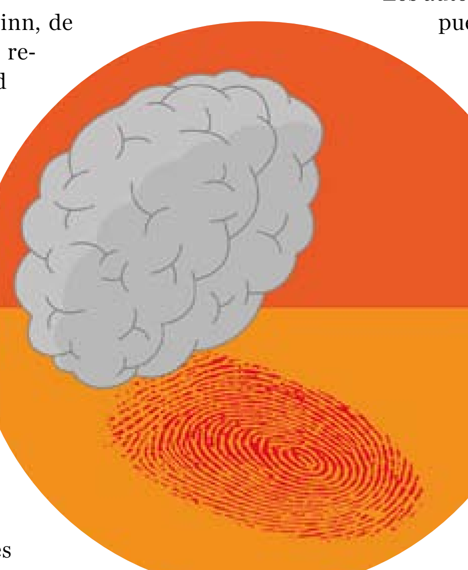
NEUROLOGÍA

Las «huellas dactilares» del cerebro

Una técnica de resonancia permite identificar los rasgos distintivos del cerebro de cada individuo

Todos intuimos que somos únicos, y los métodos de identificación de personas, ya sea el examen de las huellas dactilares o de nuestro ADN, confirman esta convicción. Un novedoso estudio demuestra que la mente de cada persona también posee un patrón singular que podría utilizarse como un rasgo distintivo extraordinariamente preciso.

Los autores, dirigidos por Emily Finn, de la Universidad Yale, recurrieron a la resonancia magnética de conectividad funcional (RMcf) para examinar la actividad cerebral de 126 adultos jóvenes sanos. Se creó un «perfil de conectividad» de cada individuo basado en un cálculo de la fuerza de las conexiones entre cada par de nodos en una red formada por 268 de ellos y que representaba diversas regiones cerebrales. Esos perfiles, que podrían calificarse como dactilares, permitieron identificar a los participantes con una exactitud del 94 por ciento.



El equipo pasó entonces a analizar grupos de nodos correspondientes a redes especializadas en tareas visuales, motrices y de otro tipo con el fin de saber si algunas tienen mayor peso que otras en la individualidad. La red frontoparietal, implicada en la atención, obtuvo los mejores resultados, puesto que permitió identificar a los participantes con un 99 por ciento de éxito. Se cree que esta red de reciente evolución es sensible a la experiencia personal, mientras que las redes sensoriales y motrices se consideran más programadas de antemano. «Todos nos apartamos cuando vemos caer una piedra», explica el neurocientífico cognitivo Michael S. Gazzaniga, de la Universidad de California en Santa Bárbara. «Pero algunos somos más sagaces que otros en averiguar la causa de la caída».

Los autores del estudio descartan que estas técnicas puedan servir a fines identificativos. «No necesitamos meter a la gente en un escáner para saber quiénes son», afirma Finn. Pero el hallazgo, publicado el pasado otoño en *Nature Neuroscience*, señala las nuevas posibles aplicaciones clínicas de la RMcf. «Podría servir como un indicador personal de la salud mental», augura el experto en neuroimagen Cameron Craddock, del Instituto de Investigación Psiquiátrica Nathan S. Kline. Finn destaca que ya han comenzado a analizar los datos de adolescentes con alto riesgo de esquizofrenia para averiguar si las resonancias permitirán pronosticar cuáles sufrirán el trastorno en el futuro.

—*Simon Makin*

PSICOLOGÍA

Finanzas impersonales

Los ejecutivos de la banca de inversión son capaces de dejar todo de lado... incluso su propia identidad

Para la mayoría de las personas, la identidad está ligada al trabajo. Nos esforzamos para que nuestro empleo adquiera significado y las críticas al respecto nos afectan personalmente. Ese no parece ser el caso de los ejecutivos de la banca de inversión. Estos individuos disocian trabajo e identidad propia hasta tal punto que los investigadores han acuñado una nueva expresión para referirse al fenómeno: «manipulación teflónica de la identidad».

La denominación surgió a partir de una serie de entrevistas realizadas durante casi dos años a seis banqueros de inversión de Londres. Todos ellos describieron situaciones laborales frecuentes en las que se las apañaban para eludir su identidad. Uno de ellos, por ejemplo, dijo, hablando de su explosivo jefe: «Ya estoy más o menos acostumbrado, y la verdad es que me resbala... Me lo tomo como mi trabajo, no como algo personal».

Tales malabarismos psicológicos quizá se deban al entorno exigente y explotador que prevalece en el sector bancario, opina Maxine Robertson, coautora del estudio y profesora de innovación y organización en la Universidad Queen Mary de Londres. La reducción del yo a la mínima expresión podría ser un mecanismo para salir adelante. Según el estudio, cuyos resultados aparecieron publicados hace poco en la revista *Organization Studies*, los sujetos justificaron ese desapego psicológico debido a la cantidad de dinero que ganaban.



THOMAS FUCHS

Alden Cass, psicólogo clínico de Nueva York que no participó en el estudio, se muestra preocupado por el coste a largo plazo. Al anteponer el dinero a la salud mental, señala, se corre el riesgo de acabar exhausto, sufrir dolencias físicas, abusar de las drogas e incluso divorciarse.

El estudio, con pocos participantes, tal vez no pueda generalizarse a otros empleados del sector financiero, pero no deja de resultar notable dada la escasez de investigaciones sobre la pérdida de identidad. Los autores se preguntan ahora si las mismas «manipulaciones teflónicas» no se producirán también en otros ambientes con alto grado de estrés, como el mundo académico.

—*Shannon Hall*

BIOLOGÍA

Cáncer: multiplicarse o conquistar

Las células tumorales no pueden proliferar e invadir a la vez otras partes del organismo

Las células cancerosas más temibles no descansan nunca. Producen metástasis, esto es, migran del foco inicial a otras partes del organismo donde crean nuevos tumores. Y cuando el cáncer se extiende es más difícil de erradicar. Un estudio a cargo de biólogos del desarrollo aporta un nuevo indicio sobre cómo las células cancerosas adquieren la facultad de invadir otros tejidos, un paso indispensable para la metástasis. El trabajo revela que para que tenga lugar la invasión las células deben cesar de dividirse. Así pues, ambos procesos, la invasión y la proliferación, serían mutuamente excluyentes. El descubrimiento podría impulsar la creación de nuevos tratamientos contra el cáncer, los cuales suelen tener como blanco las células cancerosas que se multiplican con rapidez.

David Matus, de la Universidad Stony Brook, y David Sherwood, de la Universidad Duke, han recurrido a un gusano transparente para dilucidar ese proceso de invasión. Durante el desarrollo normal del animal, un tipo de célula llamado célula de anclaje se abre paso a través de la membrana basal, que en un principio separa el útero de la vulva. El proceso es similar al modo en que las células del cáncer humano invaden las membranas basales para acceder al torrente sanguíneo, que las arrastra a lugares distantes. Así que los biólogos han adoptado a *Caenorhabditis elegans* como organismo modelo de la metástasis, pues se presta a una fácil captación de imágenes y a una manipulación genética sencilla.

Después de activar y desactivar la expresión de cientos de genes de *C. elegans*, el equipo de Matus halló uno que regula la invasión de las células de anclaje. Mientras permaneció desactivado, las células no pudieron invadir la membrana basal. Pero también hicieron algo insólito: comenzaron a dividirse. Y viceversa, cuando los investigadores inhibieron la proliferación, cesaron de multiplicarse y reanudaron la invasión. Nuevos experimentos demostraron que la paralización de la división celular era al tiempo necesaria y suficiente para la invasión. Aparte de las observaciones esporádicas realizadas por algunos histopatólogos que apuntaban en la misma dirección, el nuevo estudio desvela el mecanismo genético que explica por qué ambos procesos son mutuamente excluyentes. Los resultados se publicaron el pasado octubre en la revista *Developmental Cell*.



Las protuberancias y las proyecciones filiformes son rasgos distintivos de las células cancerosas, como la de cuello uterino que se ve en la imagen.

El estudio demuestra también la consabida pero misteriosa observación de que el frente de invasión de muchos tumores no acoge células en división, sino que las células invasoras marchan en vanguardia y son aquellas las que las empujan hacia el tejido sano a medida que crece el tumor. «Este estudio cambia en cierta medida nuestro modo de ver el cáncer», aclara Matus. «Solemos pensar en él como una enfermedad de división celular incontrolada; tanto es así que muchos antineoplásicos están concebidos para atacar esas células en división. Pero el presente estudio plantea la importancia de averiguar cómo atacar las células que no se multiplican, puesto que son las invasoras».

No obstante, para que el descubrimiento trascienda a los tratamientos contra el cáncer, serán necesarios más ensayos. «Podemos ahora tomar este modelo sencillo y aplicarlo a sistemas más complejos, como los tumores malignos de mama», aclara Andrew Ewald, biólogo celular especializado en cáncer de la Universidad Johns Hopkins. Solo el cáncer de mama metastásico se cobra 40.000 vidas cada año en EE.UU., pero la supervivencia a los cinco años raya el cien por cien si es detectado antes de la diseminación. *—Viviane Callier*

COMPORTAMIENTO ANIMAL

La toma de decisiones en los bisontes

Las manadas se desplazan en la dirección elegida por la mayoría de sus integrantes

Cada pocos años, los ciudadanos eligen a su alcalde. El proceso es bastante simple: la ciudadanía vota y el candidato más votado gana. Lo mismo sucede en algunos bovinos. La ecóloga Amandine Ramos, del Centro Nacional para la Investigación Científica (CNRS) francés, pasó tres meses observando una manada de bisontes en la Reserva Biológica de los Montes de Azur, a una treintena de kilómetros de Niza. Resulta que el bisonte europeo se rige por la regla de la mayoría.

Los miembros de esta especie «emiten su voto» orientando el cuerpo hacia la dirección a la que quieren ir, ha observado Ramos. Si quieren pastar en un prado, se encaran hacia él. Si, en cambio, prefieren saciar la sed, apuntan hacia un abrevadero. Al final uno acaba dando el primer paso: si avanza en la dirección preferida por la mayoría, el rebaño lo seguirá en tropel. Pero si escoge otra opción minoritaria, pocos lo secundarán y el grupo quedará dividido durante un breve lapso. Cualquiera puede dar el primer paso, pero suelen ser las hembras adultas las que arrastran el mayor número de seguidores. En definitiva, quien recibe más votos gana y encabeza el grueso de la manada. El estudio ha sido publicado recientemente en *Animal Behaviour*.

Los hallazgos podrían servir a los gestores del parque para paliar los conflictos con los agricultores, cuyos campos sufren con frecuencia destrozos a manos de este gran herbívoro. Si se instalaran collares que propinaran pequeñas descargas eléctricas a los ejemplares con más opciones de convertirse en líderes, tal vez se podría controlar a toda la manada. El bisonte europeo no es el único animal que toma decisiones colectivas. Ese mismo comportamiento se ha observado en otros ungulados, como el búfalo africano, y en algunos primates, como los macacos de Togian. Según Ramos, el estudio es un recordatorio de que «la comunicación y el consenso son procesos presentes también en el reino animal». La democracia, o por lo menos una guisa de ella, no es exclusiva de *Homo sapiens*. *—Jason G. Goldman*

STEVE GSCHMEISSNER, SCIENCE SOURCE (*célula tumoral*); JAMES BALOG, GETTY IMAGES (*bisontes*)

TECNOLOGÍA

Posicionamiento ubicuo

Una nuevo sistema basado en una red terrestre promete eliminar los puntos ciegos del GPS

Todo aquel que haya intentado determinar su localización en un centro comercial, un aeropuerto o un desfiladero urbano rodeado de rascacielos habrá experimentado un fallo del GPS. La red de posicionamiento global se encuentra plagada de puntos ciegos: edificios, bloqueadores de señal e incluso el paisaje pueden interrumpir la comunicación entre los satélites y el receptor. Algunas técnicas, como el protocolo iBeacon de Apple, han intentado cubrir esos huecos con sensores que rastrean la ubicación en interiores mediante redes Wi-Fi o Bluetooth. Sin embargo, el primer sistema que ha conseguido fundirse sin interrupciones con la red GPS es el creado por la compañía australiana Locata. Y lo hace con una precisión envidiable.

El GPS determina la posición del usuario midiendo el tiempo que tardan las señales en llegar desde un satélite en órbita hasta el receptor. Tres lecturas de este tipo procedentes de otros tantos satélites permiten determinar la latitud y la longitud, mientras que una cuarta calcula la altitud. Cada satélite lleva cuatro relojes atómicos que se sincronizan dos veces al día con un reloj maestro situado en Colorado Springs. Los puntos ciegos aparecen por una razón muy sencilla: si, al moverse, el usuario se aparta de la visual de los satélites, la señal se perderá.

El sistema de Locata resuelve el problema con una red independiente de transceptores instalados en tierra firme. En un ensayo realizado el año pasado en Washington D.C. por el Observatorio Naval de EE.UU., la división que se ocupa de mantener el reloj maestro del GPS, la red de Locata se sincronizó en 200 billonésimas de segundo, 50 veces más rápido que el GPS. Y, al contrario que este, sus señales cuentan con la intensidad suficiente para atravesar paredes. «Se parece más a una zona Wi-Fi», explica Nuncio Gambale, consejero delegado y cofundador de Locata, que ha trabajado dos décadas en el diseño de la nueva técnica.

Lo más probable es que el método aún tarde unos diez años en llegar a los consumidores. Sin embargo, ya ha tenido éxito en algunas asociaciones comerciales, como la acordada hace poco con el Centro de Investigación Langley de la NASA, donde se ha usado para mejorar la seguridad de aviones no tripulados. Las redes de Locata también han ayudado a evaluar la eficacia de los sistemas para prevenir accidentes de tráfico del Instituto de Aseguradoras para la Seguridad Viaria, y han sido empleados para monitorizar la posición de los aviones de la Fuerza Aérea de EE.UU. en el Campo de Misiles de Arenas Blancas, en Nuevo México, donde el GPS se encuentra actualmente bloqueado para simular un entorno bélico.

Según Gambale, lo ideal sería que los transceptores de Locata se integrasen en todas las torres de telefonía móvil, lo que permitiría a los usuarios saber sus coordenadas con una precisión de un centímetro. Antes o después, los receptores serán tan pequeños que podrán incorporarse en teléfonos y en todo tipo de dispositivos, desde relojes y chapas de identificación hasta automóviles sin conductor. «La próxima generación de aparatos requerirá una gran sincronización», vaticina Gambale. «La Internet de las Cosas, que es inevitable y ya se avecina, nos pone el listón muy alto.» —*Corinne Iozzio*



El sistema de posicionamiento de Locata cubre el Campo de Misiles de Arenas Blancas, en Nuevo México. La imagen muestra dos antenas de transmisión.

CORTESÍA DE LOCATA (*torres de posicionamiento*); MUSEO NACIONAL DE CIENCIAS NATURALES (*exposición*)

AGENDA

CONFERENCIAS

12 y 14 de enero
Pitágoras: su vida, su obra, su tiempo
David Hernández de la Fuente, UNED
Ciclo de conferencias
Fundación Juan March
Madrid
www.march.es

28 de enero
Perspectivas energéticas para África
Dan Dorner, Agencia Internacional de la Energía
Fundación Ramón Areces
Madrid
www.fundacionareces.es

EXPOSICIONES

Hasta el 15 de enero
Estevia, la panacea dulce
Palacio de Cerveró
Valencia
www.uv.es/cultura

El suelo. Un paseo por la vida
Museo Nacional de Ciencias Naturales
Madrid
www.mncn.csic.es



OTROS

21 de enero - Cinefórum
Los chicos de Brasil
(Franklin J. Schaffner)
Actividad en torno a la exposición *+Humanos*
Centro de Cultura Contemporánea de Barcelona
Barcelona
www.cccb.org

21 y 22 de enero- Congreso
300 aniversario Leibniz
Universidad Politécnica de Cataluña
Barcelona
www.ma1.upc.edu

Del 28 al 31 de enero - Feria
Global Robot Expo
Pabellón de Cristal
Casa de Campo
Madrid
www.globalrobotexpo.com

MECÁNICA CUÁNTICA

Un test de Bell sin escapatorias

Por primera vez, tres trabajos consiguen llevar a cabo un test de Bell libre de las imperfecciones hasta ahora inevitables en este tipo de experimentos. Los resultados confirman las premisas de la teoría cuántica y permiten descartar sin ambigüedades los postulados del realismo local

CARLOS ABELLÁN, WALDIMAR AMAYA Y MORGAN W. MITCHELL

La mecánica cuántica es la teoría que describe el comportamiento de los objetos microscópicos: un mundo diminuto plagado de fenómenos que nos resultan muy extraños, puesto que estamos acostumbrados a las leyes de la física clásica, o newtoniana, las cuales rigen el comportamiento de los cuerpos macroscópicos. En particular, la teoría cuántica nos dice que las propiedades de un objeto, como su posición o su velocidad, no se encuentran bien definidas hasta que no se miden. Y que, solo al medirlas, dichas propiedades toman de manera aleatoria un valor de entre varios posibles.

Otro fenómeno cuántico que carece de análogo en física clásica es el entrelazamiento. Para entenderlo, imaginemos dos partículas «sincronizadas» de tal modo que, una vez que medimos las propiedades de una de ellas, las de la otra quedan inmediatamente determinadas. Podríamos llevar cada partícula a un extremo del universo y el efecto seguiría siendo el mismo. Semejante «sincronización instantánea» marca una profunda diferencia con cualquier teoría física anterior a la mecánica cuántica.

Hace un siglo que los experimentos vienen arrojando resultados compatibles con las predicciones de la teoría cuántica. Hasta ahora, sin embargo, varias limitaciones de carácter técnico impedían descartar de manera rigurosa algunas interpretaciones alternativas.

Dichas deficiencias han sido superadas hace poco. Tres experimentos independientes realizados en la Universidad Técnica de Delft, la Universidad de Viena y el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) de EE.UU. han conseguido, por vez primera, poner a prueba las predicciones cuánticas en un montaje libre de ambigüedades. Los resultados, obtenidos en parte gracias a una nueva técnica de generación de números aleatorios, confirman los postulados de la teoría cuántica e invalidan un conjunto muy amplio de explicaciones alternativas del mundo físico.

Realismo local

Las peculiaridades de la teoría cuántica han sido objeto de debate desde los años veinte, cuando Albert Einstein y Niels Bohr iniciaron sus célebres discusiones tras la quinta conferencia Solvay. Bohr defendía con firmeza las leyes cuánticas. Einstein, sin embargo, pensaba que estas no proporcionaban una descripción completa de la realidad física.

La postura de Einstein se apoyaba en una visión del mundo conocida como realismo local. Esta se basa en dos postulados, a priori, muy intuitivos: el de realismo y el de localidad. El primero afirma que todo objeto posee un estado físico bien definido con independencia de que lo midamos o no. El segundo establece que las perturbaciones experimentadas por un objeto solo pueden deberse a fenómenos que ocurran en sus inmediaciones, nunca a acciones a distancia.

En 1964, John Bell, físico del CERN, logró formalizar el debate en términos matemáticos. Su trabajo, hoy famoso, abrió la puerta a responder de manera empírica a la pregunta filosófica de si la naturaleza obedece o no los postulados del realismo local.

Para entender el resultado de Bell, imaginemos que producimos un par de partículas entrelazadas y que enviamos cada una de ellas a un laboratorio. Una vez allí, determinaremos, de manera aleatoria e independiente, qué propiedad de cada una nos disponemos a medir (su posición o su velocidad, pongamos por caso). Repetimos el experimento un gran número de veces y, al final, comparamos los resultados obtenidos en cada estación de medida (*véase el recuadro*).

Lo que sorprendió tanto a Bell como a sus coetáneos fue comprobar que, bajo tales condiciones, las predicciones de la mecánica cuántica eran incompatibles con las de cualquier teoría realista local. Bell demostró que, en estas últimas, el grado de correlación entre los resultados obtenidos en uno y otro laboratorio debía permanecer acotado entre ciertos valores, una condición que hoy conocemos como «desigualdades de Bell». Sin embargo, la mecánica cuántica predice la violación de dichas desigualdades; es decir, un grado de correlación imposible de obtener en cualquier teoría realista local.

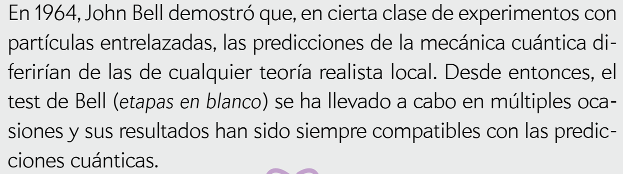
El primer test de ese tipo fue llevado a cabo en 1972 por Stuart Freedman y John Clauser, de la Universidad de California en Berkeley, y arrojó resultados a favor de la teoría cuántica. Un año después, otro experimento realizado por Richard Holt y Francis Pipkin, de Harvard, se decantó por el realismo local. Hubieron de pasar nueve años hasta que, en 1982, Alain Aspect y sus colaboradores del Instituto de Óptica del CNRS francés efectuaron un experimento más completo que los anteriores, el cual confirmó las predicciones de la mecánica cuántica. Desde entonces, un gran número de trabajos han obtenido resultados en la misma dirección.

¿Una conspiración de la naturaleza?

A pesar de que un test de Bell constituye un experimento conceptualmente sencillo, llevarlo a la práctica de la manera correcta reviste varias dificultades técnicas. Hasta ahora, la tecnología disponible obligaba a dar por buenas ciertas suposiciones sobre el comportamiento de las partículas entrelazadas y los aparatos de medida, lo que dejaba abiertos ciertos resquicios, o «lagunas», en la interpretación de los resultados (*loopholes*, en inglés, un término usado en el lenguaje jurídico para referirse a las triquiñuelas que permiten sortear una ley). Aunque casi todos los trabajos parecían refutar el realismo local, la necesidad de dar por válidas tales suposiciones no permitía descartarlo definitivamente.

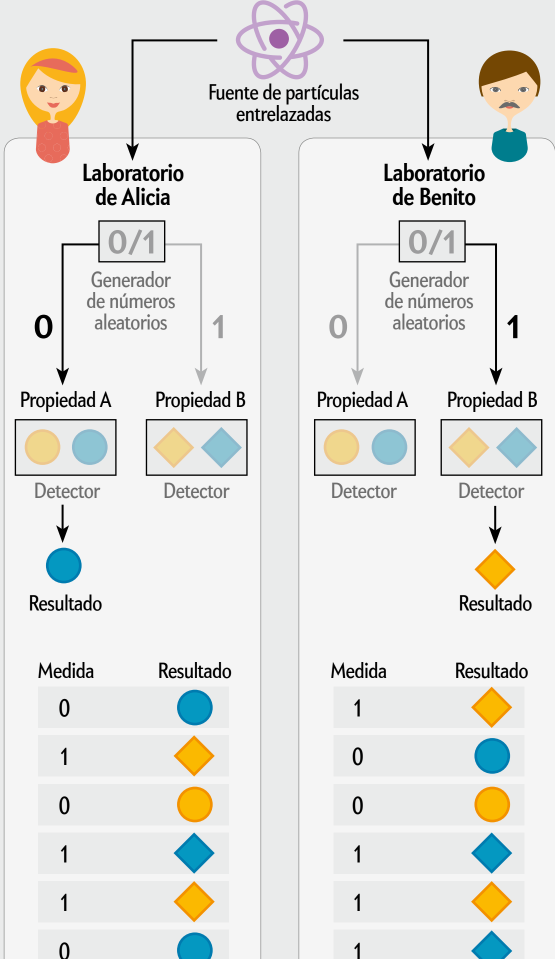
Los experimentos de Delft, Viena y el NIST han sido los primeros que han logrado sortear, de manera simultánea, las dos lagunas principales que afectaban a los tests de Bell: la de detección y la de localidad. Para entender la importancia de estos resultados, veamos primero en qué consiste cada una.

UN TEST MÁS ROBUSTO



En 1964, John Bell demostró que, en cierta clase de experimentos con partículas entrelazadas, las predicciones de la mecánica cuántica diferirían de las de cualquier teoría realista local. Desde entonces, el test de Bell (*etapas en blanco*) se ha llevado a cabo en múltiples ocasiones y sus resultados han sido siempre compatibles con las predicciones cuánticas.

Sin embargo, varias limitaciones técnicas («lagunas» experimentales, *cajas rojas*) impedían descartar por completo algunas interpretaciones alternativas de los resultados. Gracias a varios avances recientes (*cajas verdes*), tres experimentos han logrado superar dichas dificultades y desechar de manera definitiva los postulados del realismo local.



1. Se crea un par de partículas entrelazadas y se envía cada una a un laboratorio.

2. Dos experimentadores independientes, Alicia y Benito, generan sendos números aleatorios.

LAGUNA DE LA LOCALIDAD
¿Son las mediciones de Alicia y Benito realmente independientes?

SOLUCIÓN
Un sistema de **generación ultrarrápida** de números aleatorios permite seleccionar las medidas y ejecutarlas en menos tiempo del que tardaría la información en llegar de un laboratorio al otro. Ello garantiza que los dispositivos de Alicia y Benito no «conspiran» para falsear el resultado.

3. Los números aleatorios determinan qué propiedad de la partícula debe medirse en cada caso.

4. Alicia y Benito realizan la medida y anotan el resultado.

5. Las etapas anteriores se repiten un gran número de veces. A partir de los resultados se calcula el «parámetro de Bell», *S*, un número que refleja la correlación de los datos obtenidos en ambos laboratorios; es decir, con qué regularidad concuerdan en función de las medidas que se eligen.

Bell demostró que toda teoría realista local implica que $S \leq 2$. La mecánica cuántica, en cambio, predice que *S* puede sobrepasar dicho valor.

LAGUNA DE LA DETECCIÓN
¿Es fidedigna la estadística de resultados?

SOLUCIÓN
Un sistema de **detección muy eficiente** garantiza que las partículas detectadas constituyen una muestra representativa de todas las que se generan.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN LOS AUTORES

La laguna de la detección aparece cuando la eficiencia de nuestro aparato de medida no es suficientemente elevada. Es decir, de todas las partículas entrelazadas que generamos en el experimento, solo detectamos una parte. Ello obliga a suponer que todas las partículas, las midamos o no, se comportan igual.

A modo de ejemplo, imaginemos un colegio con 500 alumnos en el que preguntamos a 10 de ellos su mes de nacimiento. Si todos responden enero o febrero y extrapolamos ese resultado al conjunto de la escuela, deduciremos una estadística de nacimientos muy distinta de la que habríamos obtenido en caso de preguntar a todos los niños.

Por su parte, la laguna de la localidad hace referencia a la necesidad de garantizar que las distintas mediciones de un test de Bell no puedan influirse mutuamente. Si, de algún modo, el aparato de medida de un laboratorio «supiera» qué propiedad se está midiendo en el otro, la naturaleza podría conspirar y hacernos creer que los resultados descartan el realismo local sin que, en realidad, ocurra así.

Volviendo al ejemplo del colegio, imaginemos que todos los niños supiesen de antemano que les preguntaremos por su mes de nacimiento. Por pura diversión, podrían contestar todos lo mismo y reírse de nosotros durante el recreo. Para evitarlo, deberíamos colocar a cada alumno en una clase distinta y no decirles antes qué pregunta vamos a hacerles. Además, también tendríamos que interrogarlos a todos a la vez, ya que, si fuésemos clase por clase, los estudiantes podrían enviarse mensajes de texto con sus respuestas y contestar todos de idéntico modo.

Recordemos que, en un test de Bell, las propiedades físicas que van a medirse en uno y otro laboratorio (qué pregunta haremos a cada niño, en el ejemplo del colegio) deben seleccionarse de manera aleatoria. Para ello se emplean generadores de números aleatorios, dispositivos que producen números al azar y cuyo resultado determina el tipo de medida que efectuaremos en cada caso.

En este contexto, sortear el problema de la localidad requiere que el tiempo que tardamos en generar el número aleatorio y ejecutar la medida sea inferior al tiempo que necesitaría la información para viajar de un laboratorio a otro. Según la teoría de la relatividad, ninguna señal puede viajar más rápido que la luz, por lo que ambas estaciones de medida deberán encontrarse suficientemente alejadas.

«Superbits» aleatorios

En septiembre de 2014, durante un congreso de criptografía cuántica celebrado en París, Ronald Hanson, de Delft, impartió una charla en la que explicó qué requisitos deberían cumplir los generadores de números aleatorios para evitar la laguna de la localidad en cierto test de Bell que estaba diseñando (uno similar al que hemos explicado aquí, aunque con un montaje algo más complejo).

En aquel momento, los autores de este artículo estábamos desarrollando un generador de números aleatorios para Krister Shalm, del NIST. Nos percatamos de que nuestro método podía aplicarse también a otros experimentos, por lo que iniciamos una colaboración con Hanson y otra con Anton Zeilinger, de la Universidad de Viena. Junto con Valerio Pruneri y Daniel Mitrani, del Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO) de Castelldefels, nos pusimos manos a la obra para diseñar una nueva técnica de generación de números aleatorios que superase las limitaciones de las ya existentes.

La aleatoriedad es un concepto casi tan extraño como muchos de los que aparecen en mecánica cuántica. Todos tenemos una idea intuitiva de en qué consiste, pero nadie sabe definirla con precisión. Por ejemplo, ¿cómo podemos asegurar que una secuencia de números es verdaderamente aleatoria? [*véase* «Aleatoriedad y mecánica cuántica», por Albert Solé y Carl Hoefer; Investigación y Ciencia, septiembre de 2015]. A fin de generar números aleatorios de gran calidad, el dispositivo desarrollado en el ICFO emplea láseres semiconductores y se basa en el principio de emisión espontánea, un proceso intrínsecamente aleatorio.

Sin embargo, sortear la laguna de la localidad exige que todo el proceso se lleve a cabo con gran rapidez. En el experimento de Delft, la separación entre ambos laboratorios era de 1,3 kilómetros, una distancia que la luz puede recorrer en 4300 nanosegundos. El generador diseñado en el ICFO es capaz de producir entre 4 y 20 bits aleatorios y combinarlos en un «superbit» en menos de 100 nanosegundos. Dicho de otro modo, podíamos generar un bit de gran calidad en un tiempo muy inferior al que, según cualquier teoría relativista, tardaría la información en llegar de una estación de medida a otra.

Los resultados del experimento de Delft aparecieron publicados el pasado mes de octubre en *Nature*; los de los experimentos del NIST y de Viena se publicaron en diciembre en *Physical Review Letters*. En los tres trabajos se observó una violación de las desigualdades de Bell que, por primera vez, sorteaba simultáneamente las lagunas de la detección y de la localidad.

Veredicto experimental

¿Qué conclusión podemos extraer de estos trabajos? Violar las desigualdades de Bell sin ninguna laguna experimental implica que, o bien el realismo no describe nuestro mundo, o bien hay señales que se propagan más rápido que la luz.

Los resultados referidos aquí nos permiten salvar, como mucho, uno de los dos principios más valorados por Einstein, el realismo o la relatividad, pero no ambos. Podemos insistir en el concepto de realismo y pensar que los objetos gozan de propiedades bien definidas sin importar si las medimos o no. Sin embargo, ello nos obligaría a aceptar que las partículas pueden comunicarse mediante señales superlumínicas. Si, por el contrario, aceptamos que la velocidad de la luz impone un límite absoluto a la transmisión de información, habremos de abandonar la idea de realismo. Con respecto a esta posibilidad, Einstein preguntó una vez a otro físico: «¿De verdad crees que la Luna solo existe cuando la miramos?». Sin embargo, Einstein no vio nacer el teorema de Bell, por lo que es imposible saber si hoy rechazaría el principio de realismo, el de localidad o ambos.

Tanto en la prensa como entre la comunidad científica, el resultado de estos experimentos se ha presentado en ocasiones como una demostración de la existencia de efectos instantáneos a distancia. En nuestra opinión, esta conclusión no es evidente. Lo que para nosotros sí es definitivo es que estos resultados permiten descartar la idea de realismo. A la luz de estos experimentos, dar por bueno el realismo nos obligaría a aceptar no solo la existencia de efectos instantáneos a distancia, sino que estos tienen como objetivo confabular y presentarnos un mundo que no es el verdadero. Personalmente, dudamos que el universo dedique tanto ingenio y esfuerzo para tal fin.

Aplicaciones futuras

Si bien la conclusión principal de estos experimentos es la demostración de que el realismo local no describe nuestro mundo, la posibilidad de verificar las desigualdades de Bell en un montaje libre de ambigüedades posibilita varias aplicaciones de gran interés. En particular, una criptografía cuántica basada en estas técnicas permitiría desarrollar protocolos de comunicación seguros, incluso cuando un espía pudiese acceder a nuestros dispositivos [*véase* «Los límites físicos de la privacidad», por Artur Ekert y Renato Renner, *en este mismo número*].

Por otro lado, la técnica que hemos desarrollado para generar números aleatorios podría emplearse para mejorar los sistemas criptográficos actuales; es decir, la seguridad en Internet. Ello se debe a que, en criptografía, se emplean números aleatorios para cifrar la información. Por tanto, cuanto mayor sea la calidad de dichos números, más seguras serán nuestras comunicaciones.

Otras aplicaciones incluyen las simulaciones en superordenadores, las cuales emplean con frecuencia números aleatorios, o incluso los juegos de azar en línea, que deben producir grandes cantidades de tales números para generar los juegos de mesa de manera justa.

—Carlos Abellán, Waldimar Amaya y Morgan W. Mitchell
Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO) Castelldefels, Barcelona
Instituto de Ciencia y Tecnología de Barcelona (BIST)

PARA SABER MÁS

Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres. B. Hensen et al. en *Nature*, vol. 526, 29 de octubre de 2015. Disponible en **arxiv.org/abs/1508.05949**

Significant-loophole-free test of Bell's theorem with entangled photons. M. Giustina et al. en *Physical Review Letters* vol. 115, art. n.º 250401, 16 de diciembre de 2015. Disponible en **arxiv.org/abs/1511.03190**

Strong loophole-free test of local realism. L. K. Shalm et al. en *Physical Review Letters*, vol. 115, art. n.º 250402, 16 de diciembre de 2015. Disponible en **arxiv.org/abs/1511.03189**

EN NUESTRO ARCHIVO

Teoría cuántica y realidad. Bernard d'Espagnat en *IyC*, enero de 1980.

La realidad de los cuantos. Anton Zeilinger en *IyC*, junio de 2009.

La certeza del azar cuántico. Antonio Acín en *IyC*, enero de 2012.

ECOLOGÍA

Las termitas, aliadas inesperadas contra la desertificación

Estos insectos contribuyen a la robustez de ecosistemas de clima semiárido al ayudar a la vegetación a resistir períodos de sequía

JUAN A. BONACHELA

Lejos de la creencia popular, las termitas y otros insectos que normalmente consideramos plagas son, de hecho, beneficiosos para el ecosistema en el que viven. La opinión que nos merecen depende del punto de vista que adoptemos: mientras que en su hábitat natural las termitas realizan funciones fundamentales para el ecosistema, en nuestras ciudades y pueblos el mismo comportamiento puede llegar a dejar una casa en ruinas.

También conocidas como hormigas blancas, las termitas son insectos sociales que habitan en grandes colonias jerarquizadas compuestas por miles de individuos. Suelen vivir en climas cálidos o moderados, aunque es posible hallarlas en casi cualquier zona del planeta en la que no haga un frío extremo. De manera similar a las hormigas, las termitas viven en túneles que excavan bajo tierra. Se comunican con el exterior a través de los montículos que forman en superficie, llamados termiteros. En dichos túneles, acumulan restos de material orgánico recogido en la superficie. Y, al igual que las hormigas, las termitas descomponen estos restos para obtener energía, transformando ciertas moléculas orgánicas, que contienen elementos nutritivos, en formas inorgánicas. Tal transformación reviste una enorme importancia para el ecosistema, porque las formas inorgánicas de ciertos nutrientes esenciales, como el nitrógeno o el fósforo, son las que pueden absorber y aprovechar las plantas, que de otra manera tendrían un acceso más limitado a tales recursos. Por consiguiente, las termitas, así como otros insectos que realizan funciones semejantes mediante la descomposición de materia orgánica, desempeñan una función muy importante en algunos de los ciclos biogeoquímicos más relevantes del planeta.

Ese proceso, de sobra conocido desde hace tiempo, despertó una pregunta en nuestro equipo de investigación: ¿cómo es y qué consecuencias tiene la interacción entre las termitas y la vegetación en ecosistemas de condiciones extremas tales como los altiplanos de Kenia? ¿Puede esta interacción decirnos algo sobre el estado del ecosistema?

Patrones de vegetación regulares

En climas semiáridos como en los altiplanos de Kenia, la pregunta resulta especialmente relevante, porque hasta hace poco se aceptaba la idea de que el estado del ecosistema puede deducirse estudiando solamente la distribución espacial de la vegetación a gran escala. Dicho de otro modo, una fotografía de satélite podría informarnos sobre si el ecosistema está más o menos cerca de convertirse en un desierto y, por tanto, podría utilizarse para evaluar el riesgo de desertificación.

FOTOGRAFÍAS CORTESÍA DE ROBERT M. PRINGLE

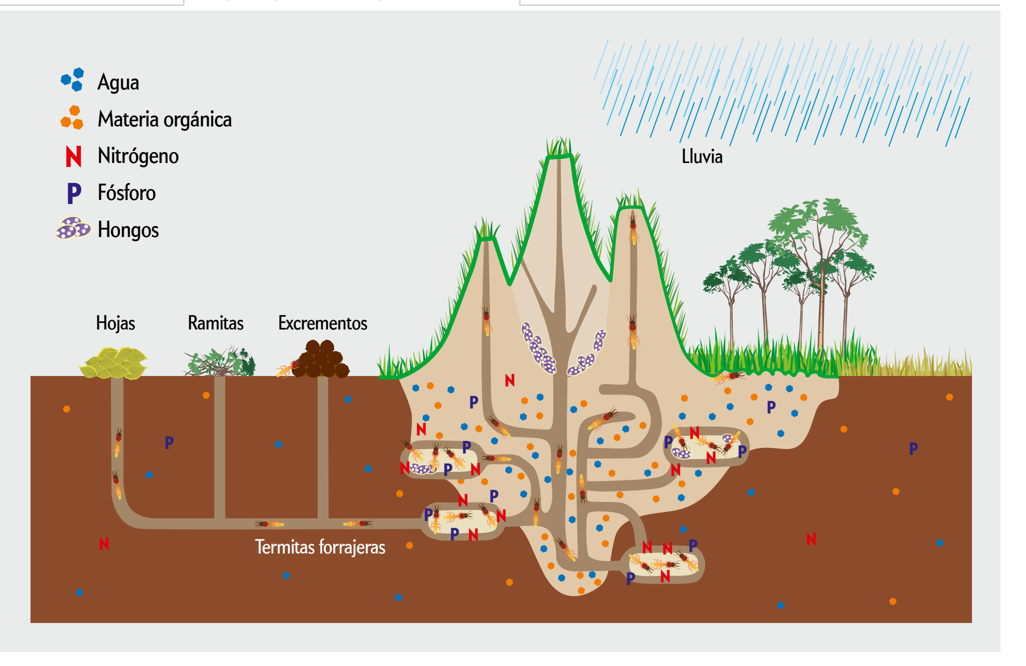




LOS TERMITEROS DE LOS ALTIPLANOS DE KENIA forman montículos que se distribuyen de forma regular en el paisaje (*abajo*). Sobre ellos crece la vegetación de manera homogénea, a diferencia del espacio que los rodea, donde la densidad y altura de las plantas resulta mucho más heterogénea (*izquierda*). El autor y su equipo han comprobado que los termiteros mitigan y retrasan la desertificación.

ISLAS DE FERTILIDAD

En zonas semiáridas, los termiteros constituyen áreas más fértiles y húmedas que el espacio que los rodea. Ello se debe a que las termitas forrajeras concentran en los montículos los residuos vegetales y excrementos de animales que van recogiendo de otros lugares. En los nidos, los hongos los procesan y los transforman en nitrógeno, fósforo y materia orgánica, los cuales aumentan la fertilidad del suelo. Las galerías que las termitas excavan en el suelo favorecen también una mejor retención de la humedad, superior a la de las zonas entre los termiteros.



Esa idea se basa en el concepto teórico y la observación empírica de que la autoorganización de la vegetación en ese tipo de climas depende en gran medida de la disponibilidad del agua de lluvia, posiblemente el recurso más limitante para el crecimiento de la vegetación en estos ecosistemas. De esta manera, una gran disponibilidad de agua favorece el desarrollo de una cobertura homogénea de vegetación, que crecerá sin problemas en cualquier punto del terreno. Pero si la cantidad de agua disponible disminuye, la competencia y otras interacciones que se establecen entre las plantas para aprovecharse de ella dan lugar a los citados patrones de autoorganización.

Por tanto, si las precipitaciones escasean mucho, esas interacciones permiten sobrevivir solo a algunas manchas cuasicirculares de vegetación que se autoorganizan regularmente en el espacio, mientras que las superficies entre las manchas quedan totalmente desprovistas de plantas. Cuando la cantidad de lluvia se sitúa por debajo de cierto umbral, la vegetación no puede sobrevivir y el sistema queda convertido en un desierto. Este comportamiento de la vegetación se ha simulado mediante unos modelos matemáticos muy bien conocidos que se crearon hace décadas.

En Kenia, las fotografías de satélite de los altiplanos muestran la mayor parte del año esa configuración de manchas de vegetación regularmente espaciadas. Nuestra hipótesis de partida planteaba que, en este caso, las apariencias engañan, y la distribución y crecimiento de las plantas no solo dependen de la disponibilidad de agua. Los altiplanos de esa región esconden un panorama más complejo en los que las termitas desempeñan una función importante.

La influencia de las termitas

Para comprobar esa hipótesis, nuestro equipo de investigación usó una metodología multidisciplinar en la que combinamos fotos y datos sobre el terreno con modelos matemáticos y conceptos físicos.

Partimos de la observación sobre el terreno de que las termitas en Kenia organizan espacialmente sus nidos de manera regular. Los termiteros se hallan separados por distancias muy similares y cada uno de ellos suele estar rodeado por otros seis. Además, en esta región presentan una forma cuasicircular y están totalmente cubiertos por vegetación. Y otro dato importante: en el espacio existente entre estos montículos regulares sigue desarrollándose vegetación, aunque esta presenta una altura y densidad de las plantas heterogénea y muy distinta a la de los termiteros.

Es más, en nuestro estudio destacamos en un principio que las manchas regulares de vegetación que se observan con el satélite corresponden en realidad a termiteros y no son simplemente el resultado de la autoorganización de la vegetación en respuesta a cierta cantidad de agua de lluvia, como se había supuesto. Por tanto, los modelos clásicos y las observaciones con satélite no son suficientes para entender y predecir estos patrones. Entonces, ¿qué sucede realmente en estos ecosistemas?

La clave son las termitas, que introducen un nivel adicional de complejidad. En concreto, los túneles presentes bajo los termiteros ayudan al agua a infiltrarse en el suelo y, por tanto, mejoran la humedad edáfica; además, la acumulación de materia orgánica en los túneles contribuye a aumentar la cantidad de nutrientes bajo el termitero. Juntos, estos dos mecanismos dan lugar al desarrollo de «islas de fertilidad» debajo y en la cercanía del termitero, donde la vegetación experimenta condiciones excepcionalmente favorables para el crecimiento (o, en cualquier caso, mucho más favorables que en las zonas entre termiteros). Así, los patrones regulares que se observan desde el satélite son el resultado de la vegetación creciendo homogéneamente sobre los montículos, mientras que la vegetación entre ellos se autoorganiza como resultado del agua disponible.

Para simular todos esos procesos, empleamos un modelo matemático que describe la interacción entre el agua y las plantas en esos ecosistemas semiáridos, pero lo modificamos para introducir la presencia de termiteros, sobre los cuales mejoran las condiciones para el crecimiento vegetal. Pusimos a prueba el modelo con cantidades de agua de llu-

via variable (deducidas a partir de datos recopilados sobre el terreno) y los resultados que obtuvimos confirmaron nuestras observaciones en el campo: la distribución de la vegetación entre los termiteros mostraba un patrón cuantitativo y cualitativo muy semejante al real. Además, la vegetación sobre los montículos del modelo teórico seguía también una distribución homogénea como los de Kenia. Los resultados corroboraban que nuestro modelo capturaba los mecanismos fundamentales del ecosistema en todas las escalas importantes.

Aplicación del modelo

Una vez contamos con un modelo que refleja la realidad de manera fidedigna, podemos usarlo para realizar estudios que, sobre el terreno, durarían décadas y, además, exigirían el control total sobre las variables del sistema real, lo cual en la práctica resulta imposible. De este modo, simulamos la respuesta del sistema a cambios controlados en la disponibilidad de agua de lluvia a gran escala, prestando especial atención a los umbrales a partir de los cuales el ecosistema pasa de tener una vegetación escasa a convertirse en desierto, o viceversa.

El modelo sin termitas, que se creó hace ya más de una década, muestra una transición abrupta entre dos fases o comportamientos generales: la fase con vegetación y la fase desértica. También indica que el sistema necesita una mayor cantidad de lluvia para recuperarse de la desertificación que la que precisa para que toda la vegetación muera. En otras palabras, es mucho más fácil que el ecosistema sucumba a la fase desértica (paso de «vegetación» a «desierto»), que se recupere una vez alcance dicha fase (paso de «desierto» a «vegetación»).

Nuestro modelo con termitas, en cambio, describe un escenario mucho más complejo. Para la misma cantidad de lluvia que en el modelo anterior determinaba una transición hacia el desierto (o viceversa), el modelo con termitas muestra una transición a una fase en la que la vegetación entre los montículos no puede sobrevivir debido a la escasez de agua, pero sí puede hacerlo sobre estas «islas de fertilidad» y, por consiguiente, el ecosistema puede permanecer en la fase de «vegetación». Esta respuesta se produce bajo un intervalo amplio de precipitaciones, de tal modo que los umbrales que llevan a la desertificación o a la recuperación tienen lugar con cantidades de lluvia inferiores a las que se necesitarían si no hubiera termiteros. Por debajo de esos umbrales, la vegetación ni siquiera puede sobrevivir sobre el termitero y, como resultado, el ecosistema se desertifica.

En otras palabras, las termitas permiten al ecosistema resistir unas condiciones que, sin ellas, resultarían tan adversas que llevarían a la desertificación; y, si a pesar de todo se sucumbe a ella, facilitan después la recuperación. Por consiguiente, las termitas y otros insectos sociales con conductas similares, como las hormigas, no solo intervienen en los ciclos biogeoquímicos al fomentar el reciclado de nutrientes, sino que también aumentan la robustez y resistencia del ecosistema ante situaciones climáticas desfavorables.

El comportamiento en el sistema vegetación-termitas observado en los ambientes semiáridos, que había sido pasado por alto hasta ahora, nos indica que muchos ecosistemas pueden ser más complejos de lo que pensamos. Si queremos explicar y predecir el comportamiento de otros ecosistemas y su posible reacción ante los cambios climáticos que nos depara el futuro cercano, necesitaremos tener en cuenta dicho nivel adicional de complejidad o, al menos, considerar la posibilidad de que factores inesperados resulten esenciales para explicar tales comportamientos.

—Juan A. Bonachela
Universidad de Strathclyde
Reino Unido

PARA SABER MÁS

Self-organization of vegetation in arid ecosystems. M. Rietkerk et al. en *The American Naturalist*, vol. 160, págs. 524-530, 2002.
Spatial pattern enhances ecosystem functioning in an African savanna. R. M. Pringle et al. en *PLOS Biology*, vol. 8, e1000377, 2010.
Termite mounds can increase the robustness of dryland ecosystems to climatic change. Juan A. Bonachela et al en *Science*, vol. 345, n.º 651, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Autoorganización de la vegetación en tierras áridas y semiáridas. Víctor Fairén LeLay en *IyC*, agosto de 2007.
Espartales ibéricos. Fernando Maestre en *IyC*, septiembre de 2008.

TECNOLOGÍA

Biomicrofluídica, una nueva herramienta para la investigación biomédica

Una técnica que ayer se usaba para fabricar microchips se aplica hoy al ensayo in vitro de fármacos contra el cáncer

JOSÉ MARÍA AYUSO DOMÍNGUEZ, MARÍA VIRUMBRALES MUÑOZ

La primera causa de muerte en los países desarrollados corresponde al cáncer, un conjunto amplísimo de enfermedades muy diferentes, cuya única característica común es la proliferación descontrolada de células.

Debido a su rápido crecimiento, las células tumorales consumen una enorme cantidad de recursos y energía, lo que provoca una acusada disminución de los nutrientes y el oxígeno alrededor del tumor. Ello activa distintas respuestas que preparan a las células tumorales para adaptarse a este ambiente hostil; en otras palabras, se «entrenan» para sobrevivir en estas condiciones. Al mismo tiempo, aumentan su capacidad de movimiento para tratar de encontrar un entorno más rico en nutrientes. Este hecho contribuye a la aparición de la temida metástasis, esto es, la invasión de otros tejidos. Por su parte, el organismo detecta esta falta de nutrientes en la periferia del tumor. Engañado, trata de compensarlo aumentando el aporte sanguíneo a dicha zona, lo que acelera aún más el crecimiento tumoral.

El desarrollo tumoral es, por tanto, un proceso muy complejo en el que intervienen distintos tipos celulares y factores bioquímicos. Sin embargo, la mayor parte de la investigación in vitro sobre la fisiología del cáncer se lleva a cabo en las clásicas placas de Petri, donde no es posible reproducir las complejas situaciones que acabamos de describir. Solo permiten simular escenarios más simples (que no tienen en cuenta los gradientes de oxígeno y nutrientes) y no valen para estudiar la influencia de las células sanas del paciente, su sistema inmunitario o los vasos sanguíneos, que acaban sirviendo a los propósitos del tumor.

Todo ello se traduce en que los estudios farmacológicos estándar no tienen en cuenta muchos de los aspectos más agresivos del tumor, como su capacidad de adaptarse o de invadir el tejido circundante. De ahí que de cada 10.000 antitumorales que se prueban in vitro, tan solo 5 lleguen a la fase de ensayo clínico con pacientes. Asimismo, estas limitaciones se traducen en unos costes de desarrollo elevadísimos (las inversiones requeridas para que un nuevo fármaco llegue al paciente ascienden a millones de dólares), lo que hace que las perspectivas de éxito se vuelvan desesperanzadoras.

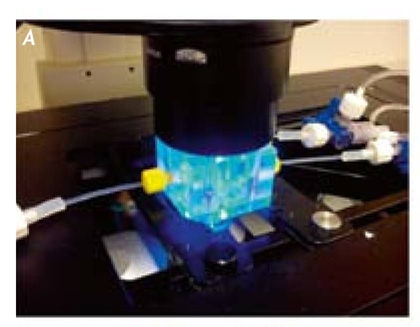
El cáncer en un chip

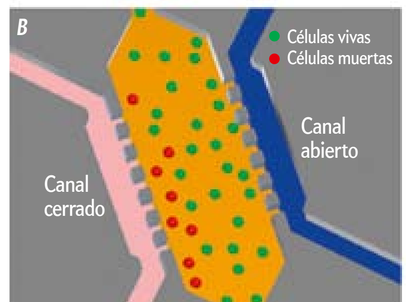
En ese contexto ha surgido la biomicrofluídica, una nueva disciplina que trata de reproducir en pequeños microdispositivos la estructura y organización de los tejidos del organismo, con el propósito de simular su comportamiento y tratar así de entender los procesos fisiológicos más complejos.

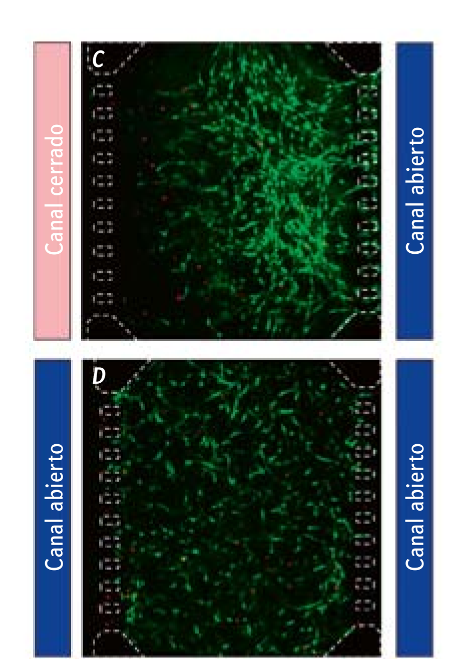
Para la fabricación de ese tipo de microdispositivos se recurre a las mismas técnicas de fotolitografía que llevan años empleándose en la obtención de circuitos electrónicos. Se utilizan una serie de fotorresinas que, al ser expuestas a luz ultravioleta se vuelven resistentes (fotorresinas negativas) o sensibles (fotorresinas positivas) a distintos solventes. Se exponen a la radiación solo unas regiones de la fotorresina; las otras, permanecen sin irradiar. Este proceso permite obtener estructuras con la forma deseada y con una resolución que alcanza hasta los pocos micrómetros (la milésima parte de un milímetro).

Mediante estas técnicas podemos fabricar pequeños sistemas provistos de cámaras de cultivo, que quedan conectadas por una serie de canales que imitan así a nuestros vasos sanguíneos. Una vez terminada la estructura, tan solo tenemos que introducir en dichas cámaras los tipos celulares con los que deseemos trabajar.

En nuestro laboratorio, introdujimos en una de esas cámaras células tumorales combinadas con una matriz proteica







EN UN SISTEMA BIOMICROFLUÍDICO, los microdispositivos suelen incluirse en moldes de mayor tamaño que permiten acoplar tubos y conexiones para hacer fluir distintos líquidos (*A*). En el caso que se ilustra, primero se cerró un canal lateral (*rosa en B*) y se hizo fluir medio de cultivo por el otro (*azul en B*). En estas condiciones, la mayoría de las células vivas (*verde en C*) comenzó a invadir la matriz en dirección al canal perfundido. En cambio, cuando ambos canales se dejaron abiertos (*D*), la concentración de nutrientes se mantuvo homogénea a lo largo de la cámara y no se produjo migración celular direccional.

CORTESÍA DE LOS AUTORES

tridimensional. A través de unos canales laterales hicimos pasar nutrientes, tal como ocurre en nuestros capilares sanguíneos. A medida que las células iban consumiendo los nutrientes, observamos que estas invadían el tejido circundante, avanzando hacia los canales.

El mismo dispositivo nos sirvió para estudiar el modo en que las células de distintos tumores (de piel, cerebral) son capaces de detectar de dónde provienen los nutrientes y moverse a través del tejido para alcanzar las zonas más ricas.

A partir de dichos ensayos, cuyos resultados publicamos el pasado octubre en *PLoS One*, hemos demostrado que, ante la falta de nutrientes, las células se tornan más agresivas e invaden el tejido circundante. En este momento estamos explorando nuevas opciones terapéuticas, como el empleo de fármacos antimigratorios que puedan ayudar a frenar esta invasión. Combinados con los tratamientos tradicionales (cisplatino, metotrexato, doxorrubicina), podrían acabar con el tumor.

Potencial y retos

Nuestro trabajo ofrece tan solo un ejemplo del potencial de la biomicrofluídica. Si damos un paso atrás para observar el panorama completo, veremos que las aplicaciones de esta técnica son numerosas y diversas. En fecha reciente, compañías farmacéuticas como AstraZeneca, Johnson & Johnson o GlaxoSmithKline, y gobiernos como el de Estados Unidos o Suiza, han comenzado a realizar inversiones importantes en esta técnica. La Universidad Harvard lidera el proyecto Human-on-a-chip («Cuerpo humano en un chip»), en el que se pretende generar un modelo biomicrofluídico que simule las principales funciones del organismo humano.

Al facilitar el estudio de las bases celulares de diferentes enfermedades, se espera que esta técnica reduzca la necesidad de recurrir a la investigación con animales. Si bien es probable que el ensayo en pacientes continúe siendo la prueba final para la aprobación de un fármaco, la comunidad internacional está haciendo un esfuerzo por minimizar el uso de animales de experimentación. La biomicrofluídica abre nuevas vías para avanzar en esta dirección.

A pesar de su enorme potencial, la biomicrofluídica tiene todavía un uso minoritario en la investigación biomédica. La complejidad de la fabricación de los microdispositivos, junto con la necesidad de unas instalaciones muy especializadas, ha hecho que esta técnica continúe anclada dentro del ámbito de la ingeniería. Además, para controlar estos sistemas a menudo se requieren profundos conocimientos sobre física de fluidos, lo que obliga al investigador a llevar a cabo un considerable esfuerzo para aprender a utilizarlos correctamente. Para que la biomicrofluídica pueda imponerse como una herramienta poderosa y de amplia aplicación, deberá simplificarse la fabricación de los microdispositivos y establecerse protocolos más eficientes que permitan un manejo fácil y directo de estos.

Hasta ahora tan solo hemos asistido al nacimiento de esta nueva técnica. Esperamos que en los próximos años se desarrolle hasta su máximo potencial y logre así mejorar la investigación biomédica in vitro.

—José María Ayuso Domínguez
y María Virumbrales Muñoz
Instituto de Investigación
en Ingeniería de Aragón
Universidad de Zaragoza

PARA SABER MÁS

The present and future role of microfluidics in biomedical research. E. K. Sackmann, A. L. Fulton y D. J. Beebe en *Nature*, vol. 507, págs. 181-189, **doi:10.1038/nature13118**, 2014.
Organs-on-chips at the frontiers of drug discovery. E. W. Esch, A. Bahinski y D. Huh en *Nature reviews. Drug discovery*, vol. 14, págs. 248-260, **doi:10.1038/nrd4539**, 2015.
Study of the chemotactic response of multicellular spheroids in a microfluidic device. J. M. Ayuso et al. en *PloS One*, vol. 10, e0139515, **doi:10.1371/journal.pone.0139515**, 2015.

LOS LÍMITES FÍSICOS DE LA PRIVACIDAD

Las leyes cuánticas implican que la criptografía segura es posible bajo supuestos asombrosamente débiles

Artur Ekert y Renato Renner



Artur Ekert es catedrático de física cuántica en la Universidad de Oxford y director del Centro de Tecnologías Cuánticas de la Universidad Nacional de Singapur. Ha destacado por sus investigaciones pioneras en criptografía cuántica.



Renato Renner es director de investigación en el Instituto de Física Teórica de la Escuela Politécnica de Zúrich.

El escritor estadounidense y criptógrafo aficionado Edgar Allan Poe escribió una vez: «Podemos afirmar categóricamente que el ingenio humano no es capaz de inventar ningún código secreto que el propio ingenio humano no pueda descifrar». ¿Es cierto? ¿Estamos condenados a perder nuestra privacidad sin importar con cuánto ahínco tratemos de preservarla?

Si nos guiamos por la historia de las comunicaciones secretas, la respuesta debería ser un rotundo sí. Numerosos ejemplos ilustran hasta qué punto los más brillantes esfuerzos para cifrar mensajes han sido igualados por el ingenio de los espías. Incluso hoy, lo mejor que la criptografía moderna puede ofrecernos es una seguridad limitada. Por ejemplo, nos garantiza que romper el sistema RSA, uno de los métodos criptográficos de clave pública más extendidos, resulta al menos tan difícil como factorizar un número entero muy grande. Pero ¿es realmente tan complicado factorizar números enteros? No con un ordenador cuántico. De hecho, tanto el sistema RSA como otros muchos de clave pública se tornarán vulnerables el mismo día en que se construya el primer ordenador cuántico. Probablemente pasarán décadas antes de que eso ocurra, pero ¿quién puede asegurar que sucederá así? Hoy por hoy, la seguridad de nuestros mejores algoritmos de cifrado solo se apoya en la lentitud del progreso tecnológico.

Aun así, los requisitos para una comunicación cien por cien segura se conocen desde hace tiempo. Si evitamos la jerga técnica, todo lo que necesitamos para diseñar un cifrado perfecto es una secuencia privada de bits aleatorios. Dicha secuencia, denominada clave criptográfica, solo debe ser conocida por el emisor y el receptor, a quienes llamaremos Alicia y Benito. Una vez que ambos dispongan de la clave, podrán comunicarse en secreto mediante un método muy sencillo conocido como «libreta de un solo uso». En concreto, la clave se convierte en un mensaje con significado cuando Alicia le dice públicamente a Benito cuáles de sus bits han de invertirse [*para una introducción breve y muy accesible, véase* «Criptografía segura», por Agustín Rayo; Investigación y Ciencia, febrero de 2015].

Si una espía, a la que llamaremos Eva, intercepta la comunicación pública, jamás podrá inferir el contenido del mensaje por más que sepa qué técnica de cifrado han empleado Alicia y Benito. Pero, para que todo funcione, es imprescindible que la clave se componga de bits verdaderamente aleatorios, que estos nunca se reutilicen para cifrar otro mensaje, y que la clave sea transmitida de forma completamente segura a Alicia y a Benito, quienes podrían hallarse a kilómetros de distancia. Aunque tal vez no resulte sencillo, todo esto es posible. Y no deja de ser asombroso lo bien que se presta la física cuántica a la tarea de distribución de claves.

La distribución cuántica de claves fue propuesta en 1984 por Charles Bennet, de IBM, y Gilles Brassard, de la Universidad de Montreal, y, en 1991, por uno de nosotros (Ekert). La seguridad de estos protocolos se basa, respectivamente, en el principio de incertidumbre de Heisenberg (existen pares de propiedades físicas tales que conocer una de ellas impide conocer la otra) y en la «monogamia» del entrelazamiento cuántico: el hecho de que ciertas correlaciones cuánticas no pueden ser compartidas por más de dos sistemas.

En un principio, la idea de usar fenómenos cuánticos para mejorar la seguridad de las comunicaciones surgió como una mera curiosidad académica. Pero, con el progreso de la tecnología cuántica, atrajo la atención de los físicos experimentales hasta el punto de convertirse en una propuesta comercial viable. Sin embargo, aunque la criptografía cuántica nos ofrece la mejor seguridad disponible hoy en día, no es inmune a los ataques que aprovechen un diseño imperfecto. Los fallos pueden ser accidentales; resultado de la ignorancia o la negligencia de quien, sin mala fe, haya fabricado nuestro sistema criptográfico cuántico. Pero también pueden ser intencionados, introducidos clandestinamente en nuestros aparatos por un adversario. ¿Deberíamos entonces diseccionar nuestros dispositivos criptográficos, analizarlos a fondo y asegurarnos de que hacen justo lo que deben? A pesar de tales precauciones, puede que algunos fallos sean desconocidos para nosotros. ¿Qué tendríamos que

EN SÍNTESIS

Los métodos criptográficos actuales no son intrínsecamente seguros. Su seguridad se basa en el largo tiempo de cómputo que, con la tecnología actual, llevaría descifrar las claves criptográficas.

Las leyes cuánticas permiten mejorar los algoritmos de cifrado. Sin embargo, hasta hace poco se pensaba que su seguridad sería vulnerable a manipulaciones malintencionadas de los dispositivos.

Varios avances recientes han demostrado que la privacidad puede garantizarse incluso sin conocer el funcionamiento interno de los aparatos de cifrado. La clave reside en el modo en que las leyes cuánticas tratan la información.

buscar exactamente? Durante largo tiempo se pensó que los límites de la privacidad se hallaban aquí. Así las cosas, la ventaja estará de parte de quien posea más recursos tecnológicos, ya sea la NSA, el GCHQ o cualquier otro servicio de inteligencia. Sorprendentemente, no es así.

Varias investigaciones recientes han demostrado que la privacidad puede garantizarse bajo supuestos asombrosamente poco restrictivos. Lo único que necesitamos son correlaciones monógamas y algo de «libre albedrío», entendido aquí como la capacidad para tomar ciertas decisiones con independencia de todo lo preexistente y, por tanto, impredecibles. Ello basta para concebir situaciones a primera vista inverosímiles. Por ejemplo, nos permite utilizar con seguridad dispositivos de procedencia dudosa —incluso manufacturados por nuestros enemigos— para generar y distribuir claves seguras. Por supuesto, hay condiciones: los aparatos deben mantenerse bien aislados a fin de evitar que sus datos se filtren, y dichos datos han de ser analizados por una entidad de confianza. Pero, con estas salvedades, una vez que los dispositivos hayan superado cierto test estadístico, podremos emplearlos con garantías y sin necesidad de conocer su funcionamiento interno.

Lo anterior constituye un hito verdaderamente reseñable, conocido como «criptografía independiente del dispositivo». Sin duda, demostrar la seguridad de una técnica de cifrado bajo condiciones tan poco restrictivas, con todas sus sutilezas matemáticas, plantea un desafío mucho mayor que hacer lo propio cuando trabajamos con dispositivos de confianza. Con todo, los rápidos avances de los últimos años han servido como acicate y han convertido la criptografía independiente del dispositivo en uno de los campos más activos de la información cuántica.

Es más, la seguridad de algunos de estos esquemas ni siquiera depende de la validez de la teoría cuántica. Es decir, su privacidad estaría garantizada incluso frente a un adversario que dispusiese de una tecnología más avanzada, o «poscuántica». Un enemigo podría también ejercer cierto control sobre las decisiones que Alicia y Benito han de tomar durante el protocolo de distribución de claves. Siempre que ese control no sea completo, nuestros amigos podrán hacer algo al respecto. Esto último se debe a que el «libre albedrío» (en concreto, la capacidad para efectuar elecciones aleatorias y, por tanto, impredecibles) puede ser amplificado. En los últimos años, la amplificación de la aleatoriedad ha dado lugar a una frenética actividad investigadora que ha culminado en un resultado insólito: todo lo que no sea completamente determinista puede hacerse completamente aleatorio. Como veremos, ello implica que, siempre que algunas de nuestras elecciones sean aleatorias y escapen al control de las autoridades, nuestros secretos podrán permanecer ocultos.

EL PODER DE LA LIBRE ELECCIÓN

Si hay un método de cifrado que se acerque a la perfección, es el de la libreta de un solo uso. Sin embargo, como avanzábamos al principio, su seguridad depende de forma crítica de que Alicia y Benito dispongan de una misma secuencia de bits aleatorios, la clave criptográfica, que solo ellos deben conocer. Además, cada uno de sus bits solo podrá usarse una vez: una por cada bit del mensaje que deseen cifrar. Por tanto, para mantener una comunicación privada, Alicia y Benito deberán hallar una forma de generar continuamente bits aleatorios y distribuírselos de forma segura. ¿Cómo?

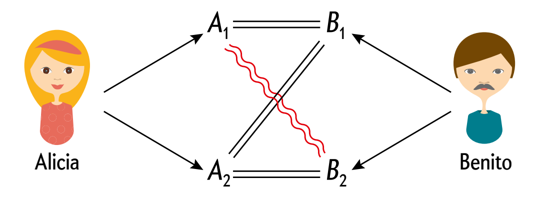
Obviemos por un momento los aspectos prácticos y fantaseemos con algo que resolvería el problema. Imaginemos que Alicia y Benito tienen a su disposición dos monedas mágicas. Al lanzarlas, hay una probabilidad del 50 por ciento de obtener una cara o una cruz, por lo que el resultado es aleatorio. Sin embargo, las monedas se encuentran mágicamente ligadas: el resultado de una y otra siempre coinciden. Por tanto, Alicia y Benito podrían lanzar sus respectivas monedas, anotar un 0 cada vez que obtienen una cara, un 1 cuando obtienen una cruz, y las secuencias resultantes serían aleatorias e idénticas. Pero ¿lograrán mantenerlas en secreto? No necesariamente. Si Eva dispusiese de una tecnología lo suficientemente avanzada, podría construir una tercera moneda mágica cuyo resultado coincidiese siempre con los de Alicia y Benito. De esta manera, Eva conocería todos los bits de la clave criptográfica.

Parece claro que, para garantizar la privacidad de la comunicación, hemos de permitir que Alicia y Benito hagan algo que quede fuera del control de Eva. Supongamos, pues, que tanto Alicia como Benito son libres de elegir una de dos monedas: Alicia puede lanzar la moneda A_1 o la A_2, y Benito, la B_1 o la B_2. En cada ocasión, nuestros amigos han de elegir cuál de ellas van a lanzar; tirar a la vez A_1 y A_2 o B_1 y B_2 no está permitido. Ahora imaginemos que las monedas están conectadas mágicamente del siguiente modo: los lanzamientos de Alicia y los de Benito siempre coinciden, salvo cuando Alicia usa A_1 y Benito B_2, en cuyo caso obtienen resultados opuestos. Tales propiedades pueden resumirse en cuatro ecuaciones: $A_1 = B_1$, $B_1 = A_2$, $A_2 = B_2$, $B_2 \neq A_1$ (*véase la figura de abajo*).

Estas condiciones son claramente incompatibles. Resulta imposible asignar valores a A_1, A_2, B_1 y B_2 de forma que se cumplan las cuatro. Recordemos, sin embargo, que Alicia y Benito solo pueden lanzar una moneda a la vez, por lo que en cada tanda solo podrán comprobar una de las cuatro condiciones. Los lanzamientos que no se efectúan no tienen resultados, por lo que, si nos atenemos a las reglas, no incurriremos en ninguna contradicción.

¿Que sucedería si Alicia pudiese saltarse las normas y lanzar sus dos monedas al mismo tiempo? En tal caso, Benito quedaría privado de su libertad de elección. Supongamos que Alicia tira primero (las correlaciones no se ven afectadas por el orden de los acontecimientos) y que obtiene $A_1 = A_2$. Entonces Benito no tendrá más remedio que lanzar B_1, ya que se trata de la única elección compatible con las condiciones enumeradas arriba. De igual modo, si Alicia obtiene $A_1 \neq A_2$, Benito solo podrá lanzar B_2.

Este sencillo razonamiento implica que nuestras monedas mágicas no pueden ser clonadas. Fabricar un clon de, por ejem-



CIERTAS CORRELACIONES IDEALIZADAS permitirían generar y compartir una clave criptográfica de forma segura. Alicia y Benito disponen de dos monedas cada uno (A_1, A_2, B_1 y B_2). En cada ocasión, eligen una y la lanzan. Las monedas están vinculadas de tal modo que siempre arrojan resultados idénticos (*líneas negras*) salvo cuando se usan A_1 y B_2, en cuyo caso se obtienen resultados opuestos (*líneas rojas*). Si Alicia y Benito son libres de elegir sus tiradas, tales correlaciones no podrán ser compartidas nunca por un tercer participante.

plo, A_1 (es decir, una moneda Z tal que $Z = A_1$) y ser capaz de lanzarlo a la vez que A_2 nos lleva a la misma contradicción que lanzar A_1 y A_2 a la vez. La existencia del clon privaría a Benito de su libertad de elección. Por tanto, si Alicia y Benito son libres de elegir en todo momento qué moneda van a usar, las correlaciones mágicas han de ser monógamas; es decir, sus monedas no pueden estar correlacionadas con nada más. Esto cambia las cosas para Eva. Ni ella ni nadie podrán construir jamás una moneda que arroje siempre el mismo resultado que alguna de las de Alicia o Benito. Ya tenemos todos los ingredientes necesarios para una distribución de claves segura.

DISTRIBUCIÓN DE CLAVES

Para establecer una clave criptográfica, Alicia y Benito lanzan sus respectivas monedas mágicas. En cada ocasión, nuestros amigos seleccionan de manera aleatoria e independiente qué moneda van a utilizar: Alicia elige entre A_1 y A_2, y Benito, entre B_1 y B_2. Después de cada tirada, ambos anuncian públicamente qué monedas han empleado, pero no el resultado obtenido. Dichos resultados son secretos, puesto que las monedas no pueden ser clonadas, e idénticos, ya que las monedas están ligadas mágicamente (excepto cuando se lanzan A_1 y B_2, en cuyo caso uno de los dos habrá de invertir su bit). De esta manera, Alicia y Benito habrán generado un bit secreto. Para obtener una clave más larga, bastará con que repitan el procedimiento tantas veces como sea necesario.

Conviene destacar que Alicia y Benito no tienen que hacer ninguna suposición sobre el origen de las monedas. Siempre que estas cumplan las cuatro condiciones que indicábamos arriba, serán válidas con independencia de quién las haya fabricado, adversarios incluidos. Por supuesto, Alicia y Benito deberán verificar que las condiciones mágicas se satisfacen. Para ello, pueden revelar públicamente los resultados de unos cuantos lanzamientos seleccionados de forma aleatoria y comprobar si obedecen o no las ecuaciones. Luego, los resultados que se han hecho públicos se descartan y la clave se genera a partir de los siguientes. Si Alicia y Benito detectan alguna desviación con respecto a las condiciones mágicas, abortan la distribución de claves y lo intentan de nuevo con otro juego de monedas.

En todo lo anterior estamos suponiendo de manera tácita que Alicia y Benito pueden comunicarse en público, pero de forma que resulte imposible alterar sus mensajes. A tal fin podrían emplear una emisora de radio, un anuncio en un periódico o algún otro método que evite las suplantaciones. Eva vigila dicha comunicación de forma pasiva, y esa es toda la información que puede obtener durante el proceso de distribución de claves, ya que las monedas se lanzan en lugares bien resguardados y protegidos contra toda filtración. Dadas estas condiciones, el secreto de la clave solo depende de la monogamia de las correlaciones mágicas y de una hipótesis inocua pero esencial: que tanto Alicia como Benito pueden elegir libremente qué moneda van a lanzar.

Parece que hemos conseguido nuestro objetivo. Sin embargo, el impecable método de distribución de claves que acabamos de proponer adolece de un pequeño problema: las correlaciones mágicas que hemos postulado no existen. Es decir, nadie conoce ningún proceso físico capaz de generarlas. Pero no todo está



ISTOCKPHOTO/DANIL MELEKHIN

perdido. Hay correlaciones físicamente admisibles y que son lo suficientemente «mágicas» para nuestros propósitos. ¡Bienvenidos al mundo cuántico!

LA SOLUCIÓN CUÁNTICA

Se cree que la mecánica cuántica gobierna el comportamiento de todos los objetos, grandes y pequeños, pero sus consecuencias se tornan más evidentes cuando consideramos sistemas microscópicos, como átomos o fotones. Tomemos como ejemplo los fotones polarizados. La luz polarizada se compone de millones y millones de ellos. Pero, desde un punto de vista cuántico, la polarización constituye una propiedad intrínseca de cada fotón, correspondiente a su espín. Aunque la polarización de un fotón puede medirse en cualquier dirección, el resultado solo puede arrojar dos valores. Estos indican si la polarización es paralela o perpendicular a la dirección de medida. Para nuestros propósitos, llamaremos a estos resultados 0 y 1.

Hay varias técnicas que permiten generar pares de fotones con sus polarizaciones entrelazadas. Tales partículas responden de manera muy coordinada a las medidas que se efectúan sobre ellas, por más que las mediciones tengan lugar en puntos muy distantes del espacio. Supongamos que generamos dos fotones entrelazados y que enviamos uno a Alicia y otro a Benito. Nuestros amigos miden sus respectivas polarizaciones a lo largo de dos direcciones especificadas por los ángulos α y β. Aunque los valores 0 y 1 cuentan con la misma probabilidad de aparecer, las leyes cuánticas predicen que los resultados de Alicia y Benito coincidirán con una probabilidad dada por $\cos^2(\alpha - \beta)$. Por el momento, esta es toda la física cuántica que necesitamos saber.

Reemplacemos ahora los lanzamientos de moneda por medidas de polarización elegidas con cierta astucia. En lugar de lanzar A_1 o A_2, Alicia medirá la polarización de su fotón a lo largo de las direcciones dadas por los ángulos $\alpha_1 = 0$ o $\alpha_2 = 2\pi/8$. De igual modo, Benito sustituirá los lanzamientos de B_1 y B_2 por medidas de polarización con ángulos $\beta_1 = \pi/8$ y $\beta_2 = 3\pi/8$. Las probabilidades conjuntas de todos los resultados posibles, obtenidas a partir de la fórmula del coseno y los ángulos mencionados, pueden extraerse de la siguiente tabla:

	$A_1 = 0$	$A_1 = 1$	$A_2 = 0$	$A_2 = 1$
$B_1 = 0$	$\frac{1-\varepsilon}{2}$	$\frac{\varepsilon}{2}$	$\frac{1-\varepsilon}{2}$	$\frac{\varepsilon}{2}$
$B_1 = 1$	$\frac{\varepsilon}{2}$	$\frac{1-\varepsilon}{2}$	$\frac{\varepsilon}{2}$	$\frac{1-\varepsilon}{2}$
$B_2 = 0$	$\frac{\varepsilon}{2}$	$\frac{1-\varepsilon}{2}$	$\frac{1-\varepsilon}{2}$	$\frac{\varepsilon}{2}$
$B_2 = 1$	$\frac{1-\varepsilon}{2}$	$\frac{\varepsilon}{2}$	$\frac{\varepsilon}{2}$	$\frac{1-\varepsilon}{2}$

Esta tabla proporciona las probabilidades en términos de un parámetro genérico, ε, el cual puede entenderse como la probabilidad de desviación con respecto a las correlaciones mágicas. Estas se recuperan de manera exacta cuando $\varepsilon = 0$. Los ángulos que acabamos de especificar corresponden al valor $\varepsilon = \text{sen}^2(\pi/8) \approx 0{,}146$.

Sea cual sea el valor de ε, la tabla describe correlaciones compatibles con el principio de «no señalización»; es decir, correlaciones que no permiten transmitir información de manera instantánea. Alicia, por el mero hecho de elegir entre A_1 y A_2, no puede enviar ninguna señal a Benito. Y Benito, al escoger entre B_1 y B_2, tampoco puede comunicarle nada a Alicia. Al analizar la estadística de sus respectivos resultados, ninguno de los dos podrá saber qué está haciendo el otro.

Las correlaciones con $\varepsilon \geq 1/4$ se conocen como «clásicas», ya que permiten preasignar valores a A_1, A_2, B_1 y B_2. Esto deja de ser posible si $\varepsilon < 1/4$. Pero, como acabamos de ver, existen correlaciones físicamente admisibles para las cuales $\varepsilon = \text{sen}^2(\pi/8) \approx 0{,}146$. Dicho valor es el mínimo que permiten las leyes cuánticas. Por tanto, aunque las correlaciones mágicas perfectas ($\varepsilon = 0$) no existen, las correlaciones cuánticas aún dejan lugar para algo de magia.

MENOS REALIDAD, MÁS SEGURIDAD

La imposibilidad de asignar valores numéricos preexistentes (anteriores a la medida) a ciertas cantidades físicas, como las diferentes polarizaciones de un fotón, ha desconcertado a los físicos durante casi un siglo. A fin de cuentas, la mayoría de nosotros hemos crecido dando por supuesto que hay una realidad objetiva y que los sistemas físicos poseen propiedades cuantificables y bien definidas con independencia de que las midamos o no. Pero, por chocante que pueda parecer, el mundo no es así. Un gran número de experimentos muy minuciosos han permitido comprobar que la naturaleza viola las desigualdades estadísticas del estilo de $\varepsilon \geq 1/4$. Esta clase de expresiones, conocidas como «desigualdades de Bell», se derivan de la hipótesis de que las propiedades físicas de un objeto existen y están bien definidas antes de que las midamos. Sin embargo, es un hecho empírico que la naturaleza no respeta tales desigualdades.

No nos extenderemos aquí sobre las implicaciones filosóficas de esta peculiaridad del mundo físico. Al respecto se han escrito volúmenes enteros. Simplemente haremos notar que debería ser acogida con entusiasmo por todos aquellos interesados en garantizar la privacidad, ya que lo que no existe no puede espiarse. Como consecuencia, es mucho más fácil guardar un secreto en un mundo cuántico que en uno clásico.

En efecto, dadas las correlaciones parametrizadas por ε que reproducimos arriba, puede demostrarse que la probabilidad de que Eva adivine correctamente cualquiera de los bits obtenidos por Alicia y Benito no puede ser mayor que $(1 + 4\varepsilon)/2$. Este límite no depende de la destreza tecnológica de Eva ni —merece la pena subrayarlo— de la validez de la teoría cuántica. Puede derivarse con relativa facilidad a partir de un simple cálculo de probabilidades. Por tanto, si bien Eva puede averiguar algo acerca los resultados de Alicia y Benito (lo que no es deseable), nuestros amigos pueden, tras realizar un test estadístico y estimar ε, deducir cuánta información se encuentra al alcance de Eva en el peor de los casos (algo muy positivo). Y, si ε es lo suficientemente pequeño, ello les permitirá destilar una clave casi perfecta a partir de sus resultados. Esto último es posible gracias a una técnica conocida como «amplificación de la privacidad».

La idea básica tras la amplificación de la privacidad es sencilla. Supongamos que tenemos dos bits y que sabemos que nuestro adversario conoce, como mucho, uno de ellos, pero ignoramos cuál. Si los sumamos, el bit resultante será secreto. Dados más bits, habremos de usar métodos más elaborados para destilar una clave secreta, pero la idea básica es la misma. Por tanto, si Alicia y Benito cuentan con dispositivos que generan resultados correlacionados, podrán ejecutar el protocolo de distribución de claves y complementarlo con un test estadístico «de honestidad» para estimar ε. Y, si el valor de este parámetro es lo suficientemente pequeño (como, por ejemplo, $\varepsilon = 0{,}15$), la



ISTOCKPHOTO/DANIL MELEKHIN

técnica de amplificación de la privacidad les permitirá obtener una clave criptográfica perfecta.

Así pues, parece posible asegurar la privacidad incluso con dispositivos de procedencia dudosa. Pero ¿qué entendemos por dispositivo? Antes de celebrar la consecución del cifrado perfecto, aún deberemos resolver una cuestión: ¿pueden Alicia y Benito confiar en los dispositivos últimos de medida y control? Es decir, ¿pueden confiar en sí mismos?

¿DEBEMOS FIARNOS DE NOSOTROS MISMOS?

Hemos llegado a los límites de la paranoia. ¿Gozamos de libertad de elección, o nos hallamos sujetos a los designios de un poder supremo? En otras palabras, ¿qué ocurre si alguien nos está manipulando?

Al principio de este artículo subrayábamos el poder de la libre elección. Decisiones como qué moneda lanzar o qué polarización medir deben poder tomarse con libertad (o de forma aleatoria) y de manera independiente. Si hacer referencia al «libre albedrío» del experimentador suena demasiado esotérico, pensemos en los generadores de números aleatorios que, en la práctica, toman tales decisiones en los experimentos. ¿De dónde proviene su aleatoriedad? ¿Qué ocurre si no podemos fiarnos de ellos, tal vez porque han sido fabricados por la misma persona que nos ofrece el kit de distribución de claves? No cabe duda de que sin aleatoriedad no hay privacidad: si todo está predeterminado, y si todas las decisiones que tomemos son predecibles o han sido previamente programadas por nuestros adversarios (ya sea mediante generadores de números aleatorios manipulados o de otro modo), no hay nada en lo que basar nuestra privacidad. ¿O acaso sí?

Sí lo hay si la manipulación no es completa y se nos permite un mínimo de libertad en nuestras elecciones. Si alguien en quien confiamos nos asegura que cierto porcentaje de las elecciones que tomamos mediante nuestro generador de números aleatorios no pueden ser determinadas por el adversario, la privacidad es aún posible. Ello se debe a que la aleatoriedad local puede ser amplificada, un resultado demostrado en 2012 por Roger Colbeck, ahora en la Universidad de York, y uno de nosotros (Renner). A su vez, la amplificación de la aleatoriedad puede llevarse a cabo mediante protocolos independientes del dispositivo. El método funciona incluso si la fracción inicial de aleatoriedad es arbitrariamente pequeña y si nuestros aparatos adolecen de ruido estadístico.

Todo lo anterior tal vez parezca extraño y demasiado bueno para ser verdad. ¿Una privacidad perfecta frente a adversarios poderosos, que nos proporcionan las herramientas criptográficas y que pueden incluso manipularnos? ¿Es posible algo así? Lo es, pero el diablo se encuentra en los detalles.

ASPECTOS TÉCNICOS

La distribución cuántica de claves cuya seguridad puede comprobarse a partir del grado en que se violan las desigualdades de Bell fue propuesta en 1991. Un año después, su viabilidad quedó patente en un experimento realizado en la antigua Agencia de Investigación para la Defensa (hoy Qinetiq) del Reino Unido. Sin embargo, la posibilidad de ejecutar este protocolo con independencia del dispositivo no fue demostrada hasta 2007. Además, no resultó sencillo certificar su seguridad en presencia de ruido experimental. Ha costado más de una década consensuar una definición útil de privacidad, incluso cuando trabajamos con dispositivos fiables. En el camino, ha sido necesario completar una larga serie de resultados sobre todos los recursos cuánticos a los que Eva puede acceder. El caso de aparatos de procedencia dudosa reviste una dificultad mucho mayor, por lo que aún ocupa a muchos de nuestros colegas de profesión.

Todas las demostraciones formales de la seguridad de tales protocolos se basan en la monogamia de las correlaciones. Pero el verdadero desafío consiste en diseñar procedimientos robustos frente al ruido y las imperfecciones y que puedan aplicarse a claves de longitud finita. Existen también otros problemas. Por ejemplo, aquí hemos dado por supuesto que Alicia y Benito pueden estimar el valor de ε a partir de una muestra de datos lo suficientemente grande. Sin embargo, una afirmación de este tipo requiere una versión cuántica de lo que en estadística clásica se conoce como teorema de De Finetti. Este nos garantiza, por ejemplo, que los pares de fotones pueden ser tratados como objetos individuales, dotados de propiedades individuales y sin correlaciones ocultas con otros pares. Este y otros resultados relativos a todo tipo de sutilezas han permitido que, veinte años después de su concepción, el protocolo de distribución de claves basado en el entrelazamiento resulte seguro aunque no podamos confiar por completo en nuestros dispositivos y aunque estos se vean afectados por el ruido experimental.

En todo lo anterior, estamos suponiendo que no hay física más allá de la teoría cuántica y que Eva se encuentra sometida a sus leyes. Sin embargo, incluso si Alicia y Benito son tan paranoicos como para pensar que su adversaria dispone de una tecnología «poscuántica» (es decir, de una basada en fenómenos aún desconocidos y no regidos por la mecánica cuántica), todavía podrían recurrir a protocolos que, si bien menos eficientes, no se apoyan en la validez de los postulados cuánticos. En todo caso, hemos de enfatizar que las técnicas independientes del dispositivo y las demostraciones de seguridad correspondientes no han alcanzado el grado de refinamiento del que hoy gozan los esquemas que sí dependen del dispositivo. En particular, aún será necesario trabajar para mejorar la eficiencia de los protocolos de distribución de claves, así como para identificar bajo qué condiciones pueden reutilizarse los aparatos de procedencia dudosa.

No obstante, dado que la violación de las desigualdades de Bell constituye un hecho empírico, ¿qué nos impide repetir los experimentos que la demuestran e interpretarlos como un protocolo de distribución de claves independiente del dispositivo? El problema reside en que, por más que resulten muy convincentes, tales experimentos suelen adolecer de varias imperfecciones técnicas, o «lagunas» (*loopholes*).

En principio, cabe la posibilidad de que los fotones detectados por Alicia y Benito no constituyan una muestra representativa de los emitidos por la fuente (laguna de la detección), o bien que entre los distintos aparatos del montaje exista una conexión causal oculta (laguna de la localidad). Varios trabajos recientes han atacado algunos de estos problemas, pero aún no existe un experimento que sortee al mismo tiempo todos los inconvenientes y que demuestre de manera definitiva la violación de las desigualdades de Bell [*este artículo fue escrito antes del primer experimento que logró llevar a cabo un test de Bell libre de imperfecciones; véase* «Un test de Bell sin escapatorias»*, en este mismo número*].

Tales deficiencias no inquietan demasiado a los físicos, ya que la naturaleza tendría que ser muy maliciosa para engañarnos de forma selectiva usando la laguna de la localidad en unos experimentos y la de detección en otros. De un adversario, en cambio, sí deberíamos esperar malicia. Por esta razón, una demostración experimental de la criptografía independiente del dispositivo requiere una verdadera violación de las desigualdades de Bell. En este contexto, el problema de la detección resulta especialmente escabroso. Imaginemos que Eva programa por anticipado los dispositivos de Alicia y Benito suponiendo que estos elegirán cierta secuencia de medidas. Cuando acierte, los aparatos responderán arrojando los resultados programados, y, cuando yerre, uno de ellos simulará un fallo y no responderá. Si Alicia y Benito descartan todas las tandas en las que al menos uno de los dispositivos parece no haber funcionado, Eva podrá engañarlos con facilidad.

Resolver el problema de la detección reviste dificultad, ya que prácticamente todos los componentes ópticos adolecen de pérdidas e introducen imperfecciones en el equipo de distribución de claves. Sin embargo, a la vista de los recientes avances en las técnicas de fotodetección, cabe afirmar que solucionarlo se encuentra al alcance de la tecnología actual. Si la distancia no nos preocupa, podremos conseguir una eficiencia de detección casi perfecta utilizando iones entrelazados en lugar de fotones, un método que ya se ha empleado para certificar por primera vez la aleatoriedad independiente del dispositivo [*véase* «La certeza del azar cuántico», por Antonio Acín; Investigación y Ciencia, enero de 2012]. A falta de una independencia total del dispositivo, cabe también contemplar escenarios intermedios, en los que algunas partes del montaje son de confianza pero otras no. Al respecto, destacan las propuestas que abordan el uso de detectores de procedencia dudosa.

Desde un punto de vista experimental, la criptografía independiente del dispositivo no es sencilla en absoluto, pero los recientes progresos técnicos nos permiten ser optimistas. Puede que el día en que no tengamos que sospechar de la buena fe ni de la profesionalidad de nuestro proveedor de servicios criptográficos no esté tan lejos.

La criptografía cuántica ha alcanzado la mayoría de edad durante la última década. Con todo, el campo sigue siendo una valiosa fuente de inspiración para la investigación fundamental. Aunque la pregunta sobre los límites físicos de la privacidad continúa aún sin una respuesta concluyente, hoy sabemos que para mantener nuestros secretos a buen recaudo bastan dos condiciones: correlaciones monógamas, sea cual sea su origen, y una cantidad arbitrariamente pequeña de libre elección. Nuestro recurso más valioso es el libre albedrío. A fin de cuentas, sin libre albedrío no tendría ningún sentido tratar de ocultar nada.

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 507, págs. 443-447, 2014.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2014

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Quantum cryptography based on Bell's theorem. Artur Ekert en *Physical Review Letters*, vol. 67, págs. 661-663, agosto de 1991.
No signaling and quantum key distribution. Jonathan Barrett, Lucien Hardy y Adrian Kent en *Physical Review Letters*, vol. 95, art. 010503, junio de 2005.
Device-independent security of quantum cryptography against collective attacks. Antonio Acín et al. en *Physical Review Letters*, vol. 98, art. 230501, junio de 2007.
Free randomness can be amplified. Roger Colbeck y Renato Renner en *Nature Physics*, vol. 8, págs. 450-454, mayo de 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

Criptografía cuántica. Charles H. Bennett, Gilles Brassard y Artur Ekert en *IyC*, diciembre de 1992.
Criptografía cuántica comercial. Gary Stix en *IyC*, marzo de 2005.
Procesamiento cuántico de la información. Antonio Acín en *IyC*, septiembre de 2006.
Aleatoriedad y mecánica cuántica. Albert Solé y Carl Hoefer en *IyC*, septiembre de 2015.



Una pirámide que cambió la civilización

La construcción del monumento más famoso de Egipto, la Gran Pirámide, dio origen a una organización social que transformó el mundo

Zach Zorich



NUEVOS DESCUBRIMIENTOS están dando protagonismo a las personas que construyeron los célebres monumentos de la meseta de Guiza, entre ellos las pirámides de los faraones Keops (*izquierda*) y Kefrén (*derecha*).

El verano de 2525 a.C. llega a su fin en Egipto y el Nilo se desborda. Para un trabajador llamado Merrer, la inundación significa que ha llegado el momento de salir a buscar piedra para construir la pirámide del faraón Keops. Tan solo 12 kilómetros lo separan de la cantera de Tura, al sureste del puerto de Guiza, pero la pesada carga de reluciente caliza blanca, que formará la capa exterior del monumento, dificulta las maniobras de los navíos. Y el río se asemeja a un inmenso océano cuando la crecida rebosa sus orillas. No obstante, Merrer ya tiene experiencia en mar abierto; la flota de barcazas y los cincuenta hombres bajo su mando se hallan en buenas manos.



Zach Zorich es escritor y redactor colaborador de *Archaeology*. En su último artículo para *Scientific American* describía el descubrimiento de una importante escultura maya en Guatemala.

Merrer divisa el destino de su flota. Desde la distancia puede ver la riada rompiendo contra un enorme muro de piedra caliza. Otros barcos que transportan cereales, madera y ganado merodean por el extremo este del muro para descargar sus mercancías en la ciudad. Pero las barcazas de Merrer no apuntan tan lejos. Tocan tierra al norte del muro, donde el dorado lecho rocoso de la meseta de Guiza forma una pendiente que llega al río, creando una rampa natural que facilitará el desplazamiento de la caliza al lugar de la obra.

Desde la orilla del río, Merrer observa el que será el edificio más alto del mundo durante los próximos 3800 años, como mínimo. Miles de trabajadores pululan por la obra de la pirámide que un día será la tumba de Keops, arrastrando las piedras hasta su lugar y comprobando una y otra vez su alineación. La estructura se encuentra casi terminada. Pronto estarán colocados los bloques de piedra de las capas superiores, y la pirámide quedará completamente revestida con caliza pulida de Tura y coronada con un piramidión dorado.

¿Quiénes eran los que construyeron la pirámide de Keops y las de otros faraones de Egipto, y por qué dedicaron su vida a esa tarea? Heródoto, el historiador griego del siglo v a.C., escribió que las pirámides habían sido construidas por ejércitos de esclavos atizados por el látigo de sus capataces. Sin embargo, el descubrimiento en las últimas décadas de otras fuentes escritas ha desvelado que la mayor parte de la mano de obra la componían cuadrillas de ciudadanos egipcios. Pero tales fuentes no ofrecían apenas información sobre la vida de estas personas. Podrían haber sido obreros mal pagados, tratados casi como esclavos; hombres sucios y medio hambrientos, que serían azotados mientras descargaban la caliza de las barcazas y la empujaban en rastras de madera hasta la pirámide.

Ahora, nuevos hallazgos, entre ellos un libro de contabilidad en papiro que documenta las actividades de Merrer y su cuadrilla, ponen finalmente el foco en los trabajadores de la pirámide y muestran bajo una luz totalmente nueva los icónicos monumentos que construyeron. La excavación de dos yacimientos clave sugiere que las pirámides no son tan solo proezas de la ingeniería. Los que las erigieron no se limitaban a arrastrar bloques de piedra. Constituían una mano de obra de élite que también se embarcaba en misiones comerciales a lugares situados a cientos de kilómetros para traer suministros y materiales de construcción. El desarrollo de esta organización laboral y red comercial tan complejas hizo posible algo más que la construcción de enormes monumentos: sentó las bases de la prosperidad egipcia durante siglos y alteró el curso de las civilizaciones posteriores.

APUNTAR ALTO

La construcción de pirámides no empezó en la meseta de Guiza. El primer templo de estas características lo levantó el faraón Zoset durante su reinado, entre los años 2650 y 2620 a.C. Se trataba de una primera pirámide escalonada de seis pisos y 60 metros de altura, que todavía domina el horizonte de Saqqara, a unos 25 kilómetros al sur de Guiza. La práctica de erigir pirámides de gran tamaño se remonta al faraón Snefru de la dinastía IV, quien llegó a levantar tres templos de estas características durante su reinado, entre el 2575 y el 2545 a.C. Tras su fallecimiento le sucedió su hijo Keops (también conocido como Jufu). El nuevo faraón solo tenía un modo de superar a su padre: construir una pirámide más grande. Y la erigiría en las lindes de la meseta de Guiza para que todos pudieran verla. La ambición le movió a crear el monumento más famoso de Egipto, de 146 metros de altura por 230 metros de anchura: la Gran Pirámide de Guiza.

El empeño de Keops no terminaría aquí. Construyó un templo funerario al este de la pirámide para que los sacerdotes pudieran comunicarse con el difunto faraón y dedicarle ofrendas que lo ayudaran en el más allá. A cada lado del templo se excavaron enormes hoyos donde colocaron embarcaciones de tamaño natural, probablemente para que Keops navegara en la

EN SÍNTESIS

Durante años, los arqueólogos que estudian las pirámides de Guiza en Egipto se han concentrado en los detalles de la ingeniería de esos monumentos. Pero el aspecto más importante de las pirámides reside en la organización social a la que dieron lugar.

Nuevos hallazgos en la antigua ciudad de Heit el-Ghurab, cerca de Guiza, y un puerto de la misma época en el mar Rojo, conocido como Wadi el-Jarf, están desvelando las infraestructuras gubernamentales, laborales y comerciales que desarrollaron los faraones para construir las pirámides, especialmente la Gran Pirámide.

Estas infraestructuras procuraron una riqueza duradera formidable y engordaron las economías de sus socios comerciales.

RENA EFFENDI (*fotografías*)



LOS EXCAVADORES DE HEIT EL-GHURAB, una antigua ciudad cerca de las pirámides, han desenterrado vestigios de los constructores de pirámides (*izquierda*). El arqueólogo Mark Lehner se asoma a un hoyo de la excavación en la zona del corral (*arriba*).

otra vida. En la cara sur de la pirámide se hallaron otras dos concavidades para barcos. Y justo al sur del templo funerario se encuentran tres pirámides de menor tamaño que sirvieron de tumbas a mujeres de la realeza. Cabe decir que el complejo fue una empresa colosal.

Durante años, la ingeniería de las pirámides ha constituido una obsesión para los arqueólogos. Los especialistas estiman que la construcción de la Gran Pirámide habría requerido unas 26.000 personas tan solo para colocar los bloques en la base de la estructura. A medida que crecía la pirámide y la superficie superior disminuía, el número de trabajadores se habría reducido. Abundan las teorías sobre el modo en que colocaban las pesadas piedras en su lugar. Según la más aceptada, crearon una rampa interna para transportar la caliza a las ubicaciones, cada vez más elevadas, de la estructura. Pero al centrarse en los detalles prácticos de la construcción, los especialistas no advirtieron el aspecto más relevante de las pirámides. Hasta hace muy poco.

Mark Lehner estrecha la mano a los visitantes e intercambia con ellos calurosos saludos en árabe cerca de Heit el-Ghurab («muro del Cuervo»). Se trata de una barrera de unos 10 metros de altura, situada a unos 800 metros al este de la Gran Pirámide. En la época de Merrer, este muro se ubicaría al norte de la ciudad que lleva el mismo nombre, Heit el-Ghurab. Hoy, desviado el río hacia el este, lo que avanza contra este muro no son las aguas de la inundación del Nilo, sino el gran crecimiento de El Cairo. Cuando los turistas fotografían las pirámides, siempre se colocan de espaldas a esta zona, prefiriendo la inmensidad del desierto al agitado horizonte de la gran urbe. Los arqueólogos han ignorado también este lugar durante mucho tiempo; una extensión de arena encajada entre la escarpada meseta de Guiza y la invasora metrópoli. Lehner, egiptólogo del Instituto Oriental de la Universidad de Chicago y director de Investigadores Asociados del Antiguo Egipto, con sede en Massachusetts, empezó a trabajar en la ciudad en 1988 con un objetivo muy concreto en mente. Se dio cuenta de que el misterio de las pirámides de Guiza no es el modo en que se cortaron y apilaron unas piedras tan grandes; el misterio reside en la gente. «Vemos la intervención humana por todas partes. Pero ¿dónde están las pruebas de su presencia?», explica. Él llegó a Heit el-Ghurab para averiguarlo.

Lehner se siente tan en casa en El Cairo moderno como en la antigua Heit el-Ghurab. Hoy lleva ropa de trabajo de campo, pantalones vaqueros, chaleco multibolsillos, sombrero de ala ancha y un par de botas polvorientas; todos han adquirido el color de la arena del desierto. Muestra un aire de autoridad cordial y es algo así como una celebridad local; a lo largo del día siempre hay quien le grita: «¡Doctor Mark!», con la esperanza de atraer su atención. Una de las mujeres con las que está charlando abre el cerrojo de una puerta metálica y el arqueólogo enfila hacia la antigua ciudad.

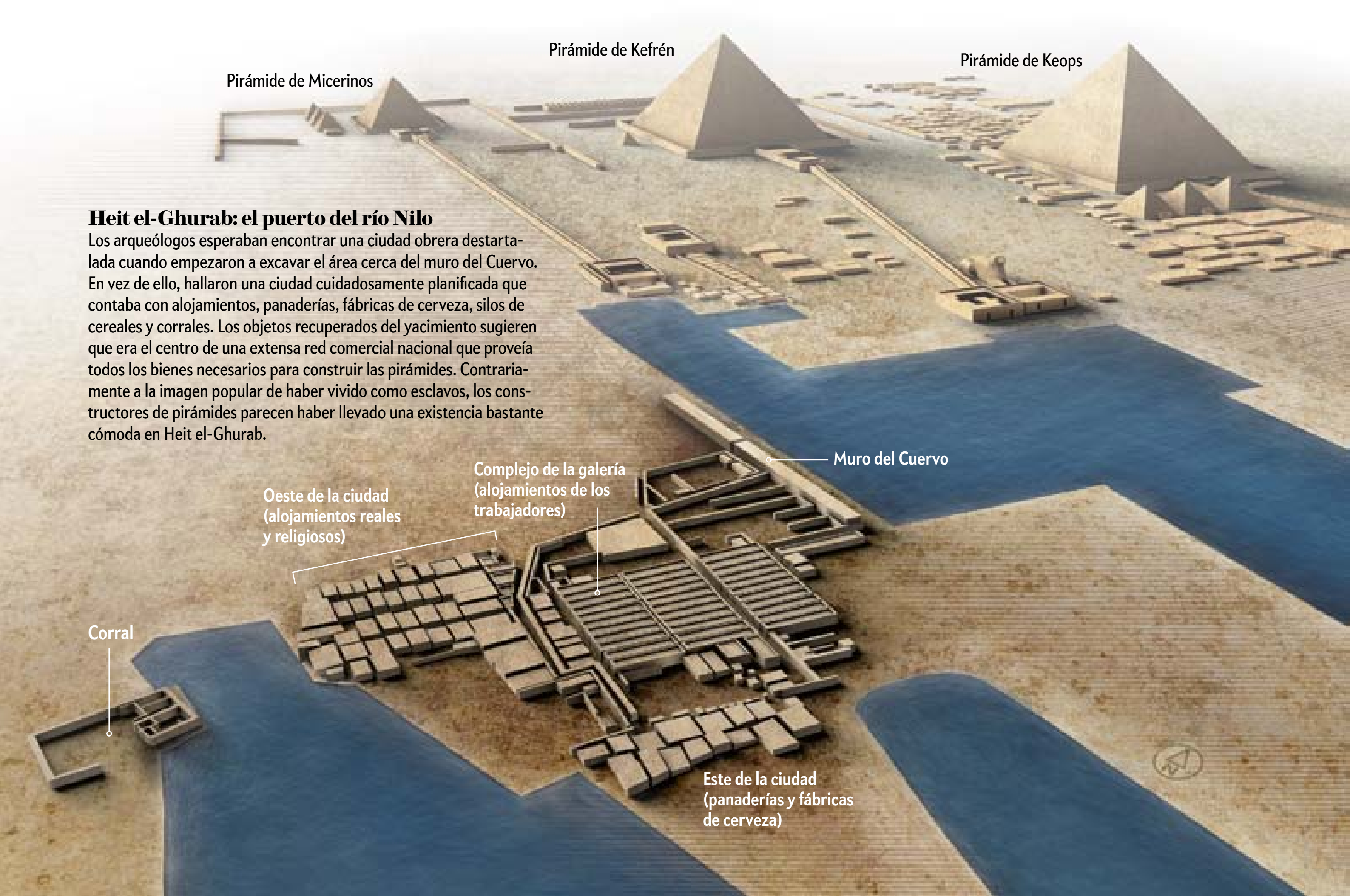
Cuando Lehner y su equipo empezaron a excavar el yacimiento, no esperaban encontrar más que un campamento modesto, un puñado de edificios inclasificables hacia donde los trabajadores, pobres y de baja condición social, arrastrarían

Una tumba para un dios

La Gran Pirámide del faraón Keops no fue la primera que se erigió en Egipto, pero sí la más grande. Su construcción en las lindes de la meseta de Guiza requirió un esfuerzo nacional. Las excavaciones en la antigua ciudad de Heit el-Ghurab, al lado de Guiza y, unos 200 kilómetros al sur, en el que fuera puerto de Wadi el-Jarf, en el golfo de Suez (uno de los brazos del mar Rojo), están desvelando cómo Keops consiguió llevar a cabo su ambición. Las pruebas indican que empleó a trabajadores de élite que no solo colocaban las piedras de la pirámide, sino que también se embarcaban en misiones comerciales a tierras lejanas. El proyecto promovió el desarrollo de una fuerza laboral muy cualificada y la creación de una extensa red comercial (*mapa a la izquierda*). Esta infraestructura, combinada con un sistema de gobierno en el que el faraón concentraba todo el poder y era considerado un dios, fue el secreto que permitió a Egipto construir la Gran Pirámide y generar una inmensa riqueza durante los siglos venideros.

Wadi el-Jarf: un puerto en el mar Rojo

Los trabajadores necesitaban herramientas de cobre para construir las pirámides. Pero obtener ese metal resultaba muy laborioso. La mayoría de los faraones consiguieron organizar solo una expedición para traer cobre. Keops, sin embargo, amasó los recursos para enviar al menos dos. Lanzó estas expediciones desde Wadi el-Jarf. Las excavaciones están dibujando un cuadro enormemente detallado de lo que ocurrió allí durante el reinado de Keops. Una zona de excavación a un kilómetro y medio de la orilla del agua ha descubierto los restos de los barcos de la expedición, que se almacenaban en cámaras (*barras blancas en el mapa de arriba*) cuando no se usaban. Los trabajadores debían desmontar los barcos para guardarlos entre un viaje y otro. Cuando llegaba el momento de zarpar de nuevo, tenían que volver a montarlos.



Heit el-Ghurab: el puerto del río Nilo

Los arqueólogos esperaban encontrar una ciudad obrera destartalada cuando empezaron a excavar el área cerca del muro del Cuervo. En vez de ello, hallaron una ciudad cuidadosamente planificada que contaba con alojamientos, panaderías, fábricas de cerveza, silos de cereales y corrales. Los objetos recuperados del yacimiento sugieren que era el centro de una extensa red comercial nacional que proveía todos los bienes necesarios para construir las pirámides. Contrariamente a la imagen popular de haber vivido como esclavos, los constructores de pirámides parecen haber llevado una existencia bastante cómoda en Heit el-Ghurab.

sus miserables vidas cada noche para volver a seguir empujando piedras al día siguiente. Sin embargo, el equipo desenterró algo mucho más complejo: una ciudad cuyo trazado y arquitectura habían sido cuidadosamente planificados por el Gobierno de Keops. Los excavadores encontraron al lado del muro el lugar donde vivían las cuadrillas de trabajadores, un área que Lehner denominó «el complejo de la galería» porque está formado por edificios largos y estrechos separados por calles. Cada edificio contenía chimeneas y plataformas donde podían dormir veinte personas (el número de hombres de cada cuadrilla), además de otra habitación que probablemente ocuparía su capataz.

Los muros de adobe señalan los puntos donde se situaban los edificios. En la actualidad miden algo más de medio metro, seguramente porque han sufrido la erosión del viento del desierto. Al sur del complejo de la galería se levantaron panaderías y fábricas de cerveza, tal y como indican los hornos de pan y las jarras de cerveza hallados en los restos de los edificios. Al sur de las panaderías se encuentra un gran edificio junto a lo que parecen ser silos para cereales, así como un recinto cercado que podría haber servido como corral. Al oeste de las panaderías se descubrió un ostentoso barrio de casas grandes. Los vertederos de esta zona desvelaron que sus residentes ingerían grandes cantidades de ternera cara, y los sellos de arcilla encontrados en las inmediaciones llevan los títulos de individuos de alto rango, lo que sugiere que los edificios servían de casa y oficina a los administradores de la ciudad.

Lejos de ser tratados como esclavos, la plantilla de Merrer y el resto de los residentes de Heit el-Ghurab, en total unas seis mil personas, parece que habrían llevado una vida bastante cómoda. Los hallazgos sugieren que, tras un duro día de trabajo descargando las barcazas, los constructores de la pirámide se habrían dirigido a la ciudad a comer. El olor a pan horneado y cerveza, a poco más de un centenar de metros de distancia, les habría avisado de lo que había en el menú. También se les habría ofrecido carne, probablemente de cabra para la cuadrilla y de vaca para los encargados. Los restos de las vasijas de cerámica para el transporte indican que habrían consumido aceite de oliva importado del Levante, en el este del Mediterráneo, un lujo no accesible para la mayoría de los egipcios.

¿Por qué el faraón Keops invirtió tanto en Heit el-Ghurab y sus residentes? En el momento en que se construyeron las pirámides, el recorrido del Nilo a lo largo de los lados norte y este de la ciudad la habría colocado en una ubicación privilegiada. Lehner cree que Heit el-Ghurab no era una «ciudad obrera» destartalada, sino un puerto del Nilo ubicado en el centro de una vasta red comercial, que se utilizaba para desembarcar todo lo necesario para la construcción de las pirámides. No eran únicamente piedras lo que arribaba, sino también mucha de la comida y la ropa que demandaban los trabajadores, así como las herramientas usadas en la construcción. Incluso los artículos de lujo propios de los sacerdotes y oficiales que supervisaban el proyecto podrían haber llegado a través de Heit el-Ghurab. La ciudad resultaba fundamental para erigir la pirámide y los mismos trabajadores constituían un recurso precioso. No solo acarreaban la piedra caliza desde Tura; también se embarcaban en misiones comerciales mucho más lejanas. Un análisis del carbón vegetal hallado en las dependencias de los trabajadores desveló que una pequeña cantidad de la madera que quemaban provenía de árboles como el cedro, el olivo y el pino, los cuales crecían solo en el Levante, a cientos de kilómetros. Esta madera exótica procedía de fragmentos de barcos, y ello hace pensar a Lehner que el personal que vivía en Heit el-Ghurab, además de colocar piedra, también se embarcaba en misiones comerciales.





ENTRE LOS OBJETOS RECUPERADOS de Heit el-Ghurab figuran moldes de pan (*arriba*) y cuchillos de pedernal (*abajo*), que están ayudando a los arqueólogos a reconstruir cómo vivían los constructores de pirámides.

TODOS PARA UNO

Keops aprovechó los sistemas gubernamental, laboral y comercial que sus predecesores habían puesto en marcha antes de que él llegara al poder. Pero el proyecto de su pirámide, de unas dimensiones sin precedentes, impulsó el desarrollo de estas infraestructuras hasta cotas vertiginosas y, al hacerlo, sentó las bases de la prosperidad egipcia para los siglos venideros. Las excavaciones en otro yacimiento también están arrojando luz sobre cómo llevó a cabo Keops su gran ambición.

A unos 200 kilómetros al sureste de Heit el-Ghurab, Gregory Marouard, también del Instituto Oriental de la Universidad de Chicago, parece caminar sobre la superficie del golfo de Suez. En realidad, está pisando un antiguo muelle de piedra situado a ras del agua en el lugar donde antaño había un puerto, hoy conocido como Wadi el-Jarf. El muelle se adentra más de un centenar de metros en el mar formando una curva, y Marouard aprovecha la marea extremadamente baja para medirlo con gran precisión. El jefe del proyecto, Pierre Tallet, de la Universidad París-Sorbona, explica desde la playa la importancia del lugar.

Los indicios preliminares sugieren que Snefru, el padre de Keops, construyó el puerto porque desde él se extendía el trayecto más corto para cruzar el mar Rojo y llegar a las minas de cobre de la península del Sinaí. La explotación del cobre constituía una empresa de gran envergadura que implicaba el traslado de casi mil trabajadores a la mina, con las provisiones necesarias para los dos o tres meses que se demoraba la extracción del metal, así como el transporte del cobre a las ciudades que lo demandaban. Parece que la mayoría de los faraones, entre ellos Snefru, organizaron solo una expedición de cobre durante sus reinados. Keops, sin embargo, contaba con el dinero, la mano de obra y el deseo de enviar al menos dos, por lo que utilizó el puerto mucho más intensamente que su padre. Necesitaba hacerlo para obtener el cobre suficiente para fabricar los numerosos cinceles, sierras y otras herramientas requeridas para construir la Gran Pirámide. Wadi el-Jarf representa un hallazgo excepcional. «No sabemos

FUENTES DE LA PÁGINA ANTERIOR: «ON THE WATERFRONT: CANALS AND HARBORS IN THE TIME OF GIZA PYRAMID-BUILDING», POR MARK LEHNER EN *AERAGRAM*, VOL. 15, N.os 1-2, PRIMAVERA/VERANO DE 2014 (*Heit el-Ghurab*); DIBUJO DE D. LAISNEY EN «AYN SUKHNA AND WADI EL-JARF: TWO NEWLY DISCOVERED PHARAONIC HARBOURS ON THE SUEZ GULF», POR PIERRE TALLET EN *BRITISH MUSEUM STUDIES IN ANCIENT EGYPT AND SUDAN*, VOL. 18, AGOSTO DE 2012 (*mapa de Wadi el-Jarf*); JOSÉ MIGUEL MAYO (*ilustración*); TERRA CARTA (*mapa*)

nada sobre la existencia de puertos en el antiguo Egipto. Es, probablemente, el más antiguo nunca descubierto», explica Tallet.

En Wadi el-Jarf, las pruebas de la vinculación del puerto con las expediciones de Keops se observan por todas partes. A un centenar de metros de la orilla se están excavando dos edificios largos rectangulares divididos en celdas de igual tamaño. Uno de ellos está formado por cinco celdas, y el otro, por diez. Tallet afirma que las celdas podrían haber albergado tanto los cargamentos como las tripulaciones de los barcos. En todos estos edificios se han hallado docenas de sellos de arcilla. Los artículos a menudo se enviaban en bolsas atadas con cuerdas y precintadas con una masa de arcilla que llevaba grabada la insignia de quien fuera el propietario del contenido de la bolsa. Muchos de los sellos llevan el nombre de Keops.

Otros hallazgos documentan con asombroso detalle las actividades que tuvieron lugar en Wadi el-Jarf. El equipo de Tallet ha dedicado gran parte de sus esfuerzos a desenterrar una serie de cámaras que fueron cavadas en una ladera situada a unos 1,5 kilómetros de la playa. Entre una expedición de cobre y otra, los navíos eran desensamblados y guardados en estas cámaras. Muchas de ellas todavía contienen trozos de cuerda de los aparejos de los barcos e incluso algunas pequeñas piezas de madera, con inscripciones en tinta roja, que indican cómo volver a ensamblar los navíos.

Todavía sorprendió más el descubrimiento de informes que Merrer había escrito en papiro hace unos 4500 años, durante el período final del Gobierno de Keops. Tallet ha tardado años en preservar y unir los fragmentos de los papiros, pero, sin duda, contienen los mejores informes disponibles sobre la rutina diaria de los trabajadores del antiguo Egipto. Tras entregar la piedra caliza de Tura en Guiza, Merrer dirigió a su tripulación hacia el norte para construir un puerto en el mar Mediterráneo. Cuando completaron esa tarea, fueron enviados a Wadi el-Jarf, donde se encargarían del transporte del cobre poco antes de que finalizara el reinado de Keops, en 2525 a.C. La primera orden del día que Merrer habría dado a sus hombres en Wadi el-Jarf habría sido que abrieran las cámaras donde estaban guardados los barcos desensamblados, los transportaran a la playa y volvieran a montar los 25 metros de eslora de los navíos, siguiendo las instrucciones registradas con tinta roja en cada pieza. Después, habrían dedicado unos meses a llevar comida de Egipto al Sinaí para los mineros, y regresarían más tarde a Wadi el-Jarf con el cobre recién extraído.

Según el papiro, casi todas las actividades de la tripulación de Merrer guardaban relación con la construcción de la Gran Pirámide. Pero si no fue la esclavitud, ¿qué los motivó a dedicar sus numerosas habilidades a este proyecto y no a otros? La respuesta la hallamos en la historia del gobierno egipcio. Desde sus inicios en el año 2950 a.C., Egipto era diferente del resto de los Estados de entonces. El primer faraón, Narmer, empleó el poder militar para mantener bajo control a todo el país, desde la costa mediterránea hasta las canteras de granito de Asuán. Por el mismo tiempo, Mesopotamia estaba gobernada por docenas de pequeñas ciudades-estado, cada una liderada por su propio rey, quien compartía poder con otras figuras religiosas y familias pudientes, explica Pascal Butterlin, de la Universidad Panteón-Sorbona. Egipto era, probablemente, la zona más grande del mundo controlada por un solo regidor, y la autoridad última para cualquier asunto dentro de sus fronteras era el faraón.

La concentración de todas las religiones y el poder político en manos del faraón significaba que la sociedad egipcia operaba de manera diferente a los demás reinos de la época, como las



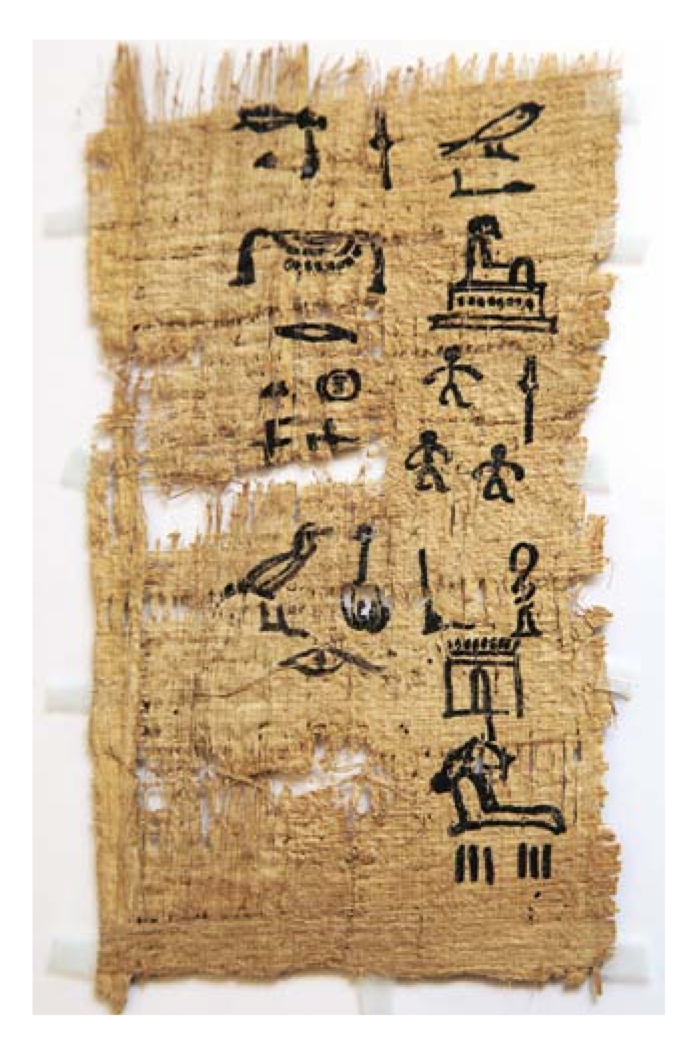
ciudades-estado mesopotámicas. Si bien los reyes mesopotámicos declaraban tener una relación cercana con sus dioses, los propios faraones egipcios se creían dioses. Bob Brier, egiptólogo de la Universidad de Long Island, piensa que la autoridad divina de los faraones les permitió exigir obediencia a sus súbditos de un modo que era imposible para los gobernantes de otros Estados. Henry Wright, de la Universidad de Michigan, especialista en la formación de los primeros Estados, sostiene que los textos egipcios apoyan esta tesis. Revelan que los trabajadores tenían motivaciones religiosas y que, probablemente, construían las pirámides por compromiso ideológico, no solo porque la ley egipcia los obligara realizar ciertas tareas para el Gobierno. «No erigían una tumba cualquiera. La erigían para un dios», observa Wright. Esa diferencia pudo haber sido lo que hizo posibles las pirámides.

PUNTO DE INFLEXIÓN

A su vez, las pirámides y la infraestructura que necesitaron dieron lugar a otros avances. Aunque Wadi el-Jarf fue abandonada tan solo cincuenta años después de su construcción, tras haber servido a su fin, allanó el camino para la edificación de otro puerto al norte, mucho más exitoso. Se llamaba Ayn Sukhna y se hallaba más cerca de Menfis, la capital, y de otros lugares donde se necesitaba cobre, como Guiza y, más tarde, el complejo funerario de Abusir, situado a unos 12 kilómetros al sur de la Gran Pirámide. Ayn Sukhna habría desempeñado un gran papel en la creación de la riqueza de Egipto. Durante casi mil años fue punto de partida y llegada de los barcos de carga desde el otro lado del mar Rojo.

Por su parte, Heit el-Ghurab continuó siendo un centro estratégico de comercio durante el resto de la dinastía IV, cuando los sucesores de Keops, Kefrén y Micerinos erigieron sus propias pirámides. Pero tras el entierro de Micerinos, la era de las pirámides de Guiza llegó a su fin. En 2450 a.C., cuando comenzó la dinastía V, los monumentos funerarios se volvieron mucho más modestos, y la ciudad de Heit el-Ghurab fue abandonada. A primera vista, estos cambios podrían parecer una señal de retroceso para Egipto. Los grandes proyectos de construcción, como las pirámides, a menudo se consideran indicadores generales de la riqueza de una sociedad. Así, durante décadas muchos egiptólogos han pensado que los faraones habían dejado de levantar monumentos gigantes para sí mismos porque la nación se había empobrecido.

Lehner aporta un argumento diferente; cree que las prioridades cambiaron a principios de la dinastía V. La infraes-



EN EL YACIMIENTO DE WADI EL-JARF, junto al mar Rojo, se han hallado restos del puerto más antiguo conocido (*izquierda*). Entre ellos se encuentran objetos tan frágiles como el fragmento de un papiro escrito (*arriba*).

tructura de comercio y mano de obra que habían creado los faraones anteriores para erigir las pirámides se reorientó hacia el desarrollo de proyectos en las provincias, lo cual contribuyó a mantener la prosperidad de la nación durante siglos. Esa infraestructura constituyó un instrumento muy poderoso. Permitía coordinar las cadenas de suministro de los recursos que se extendían cientos de kilómetros más allá de las fronteras egipcias y organizar los esfuerzos de más de un millón de personas bajo una sola autoridad. «La red se volvió más importante que la razón por la que se había creado originalmente», asegura el investigador. «Fue un punto de inflexión hacia la modernidad.»

La modernidad, en opinión de Lehner, conlleva la creación de una burocracia más compleja con una organización distribuida que fomenta el control local sobre la mano de obra y los recursos, en vez del control directo por parte de la familia del faraón. Algunas pruebas de esta burocracia proceden de la piedra de Palermo, una losa grabada descubierta en algún momento anterior a 1877 y que recogía los logros de los faraones de la dinastía III a la V. Las anotaciones registradas durante el mandato de Userkaf, el primer faraón de la dinastía V, demuestran que creó numerosas plantaciones y donó enormes extensiones de terreno para el culto a Ra, el dios del sol, como modo de estimular el desarrollo en el campo. Supervisar ese inmenso territorio requería más burócratas, que deseaban alardear de su posición con artículos de lujo y grandes tumbas. El abastecimiento de las nuevas poblaciones rurales, mientras tanto, aumentó la demanda de artículos básicos. El resultado fue un círculo virtuoso de oferta y demanda, que no solo creó riqueza para Egipto, sino que también engordó las economías de sus socios comerciales en el extranjero.

Wright coincide con Lehner hasta cierto punto: «Sin duda, supone un punto de inflexión. Es una revolución organizativa», admite. Pero se resiste a llamarlo modernidad. Según Wright, al Egipto de la dinastía V le faltaba una de las características que define a una sociedad «moderna», a saber, un cambio en los sistemas de pensamiento. Las sociedades modernas, argumenta, tienen cuerpos de conocimiento técnico de rápido crecimiento y sistemas que confirman y verifican la información. Si bien no cabe duda de que los antiguos egipcios poseían un importante cuerpo de conocimientos técnicos, la mayor parte de su acervo cultural era ritual y se obtenía mediante adivinación.

A pesar de las discrepancias sobre lo que constituye la modernidad, los especialistas coinciden en que el complejo sistema de control egipcio constituyó un avance notable. Las futuras excavaciones deberían revelar exactamente cómo sucedió ese desarrollo. Tallet planea seguir explorando Wadi el-Jarf en busca de indicios de la extensión de la red comercial egipcia. También continúa traduciendo los informes de Merrer sobre las tareas que desempeñaba su cuadrilla. Tallet sospecha que las misiones comerciales a la tierra de Punt, que se cree que se situaba en lo que hoy es Sudán, zarparon de Wadi el-Jarf, pero debe encontrar todavía esa conexión. Mientras tanto, Lehner continuará el enorme trabajo de excavar Heit el-Ghurab y analizar las incipientes pistas sobre la vida en esa antigua ciudad.

Con todo, la mejor prueba de la revolución económica que obraron las pirámides puede no hallarse en Heit el-Ghurab, ni en Wadi el-Jarf ni en la meseta de Guiza. Lehner apunta a asentamientos lejanos en el desierto occidental de Egipto y a poblaciones en Shaykh Sayed en el Egipto Medio. Estos lugares pueden aportar más indicios de que las pequeñas comunidades alejadas del antiguo centro urbano de la nación eran las que se beneficiaban de la riqueza que llegaba al país como resultado de su burocracia centralizada bajo un rey divino. Al final, el verdadero logro de Keops no consistió en levantar la Gran Pirámide, sino en crear una red de socios comerciales y organizar la mano de obra de toda una nación. Como explica Brier: «No fue un prodigio tecnológico. Fue un prodigio sociológico».

PARA SABER MÁS

The rise and fall of Ancient Egypt. Toby Wilkinson. Random House, 2011.
Ayn Sukhna and Wadi el-Jarf: Two newly discovered pharaonic harbours on the Suez Gulf. Pierre Tallet en *British Museum Studies in Ancient Egypt and Sudan*, vol. 18, págs. 147-168, agosto de 2012.
Labor and the pyramids: The Heit el-Ghurab «workers town» at Giza. Mark Lehner en *Labor in the Ancient World.* Dirigido por Piotr Steinkeller y Michael Hudson. ISLET, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

La vida diaria en el antiguo Egipto. Andrea G. McDowell en *IyC*, febrero de 1997.
¿Cuántos obreros construyeron las pirámides? Ian Stewart en *IyC*, noviembre de 1998.



El Sondeo de la Energía Oscura

Un ambicioso proyecto intentará averiguar por qué el universo se expande a un ritmo cada vez mayor

Joshua Frieman

LA CÁMARA DE LA ENERGÍA OSCURA, instalada en el Observatorio Interamericano de Cerro Tololo, en Chile, permitirá estudiar la expansión del cosmos con un detalle sin precedentes.

Joshua Frieman es cosmólogo y director del Sondeo de la Energía Oscura. Investiga en el Laboratorio del Acelerador Nacional Fermi y es catedrático de astronomía y astrofísica del Instituto Kavli para la Física del Cosmos de la Universidad de Chicago.



Hace ahora cien años, Edwin Hubble descubrió que el universo se estaba expandiendo. El astrónomo observó que casi todas las galaxias se alejaban de la Vía Láctea, y que las más lejanas lo hacían más deprisa. Pero, a finales del siglo xx, aquel hallazgo revolucionario fue sucedido por otro aún más asombroso: que la expansión cósmica se estaba acelerando. Durante largo tiempo, los científicos supusieron que la atracción gravitatoria frenaría la velocidad a la que se hincha el universo. En 1998, sin embargo, dos equipos de astrónomos que estaban estudiando supernovas (explosiones estelares que sirven como jalones cósmicos y que permiten medir distancias) constataron justo lo contrario. Aquel singular hallazgo, confirmado posteriormente por otras observaciones, fue galardonado en 2011 con el premio Nobel de física. Pero ¿qué causa que el cosmos se esté expandiendo cada vez más rápido? Esta pregunta constituye uno de los mayores enigmas a los que se enfrenta la ciencia actual.

Al respecto se han propuesto dos alternativas. Cualquiera de ellas supondría una verdadera revolución en nuestra comprensión de las leyes de la naturaleza. La primera es que tal vez ni Newton ni Einstein dijeron la última palabra sobre la gravedad. Aunque esta fuerza parece ser siempre atractiva, como ocurre en la Tierra y en el sistema solar, tal vez en las vastas distancias del espacio intergaláctico se comporte de otro modo.

La segunda hipótesis postula que el universo podría estar impregnado por una sustancia insólita, hoy llamada energía oscura, la cual contrarrestaría la fuerza de la gravedad y provocaría que las galaxias se repeliesen en lugar de atraerse. Las observaciones cosmológicas indican que, en caso de existir, la energía oscura daría hoy cuenta del 70 por ciento de toda la masa y energía del universo (masa y energía son equivalentes, como mostró Einstein por medio de la célebre ecuación $E = mc^2$). La materia oscura (un tipo de sustancia invisible que no guarda ninguna relación con la energía oscura) representa un 25 por ciento del total. Y la materia ordinaria, que incluye los átomos de los que se componen las estrellas, los planetas y los seres humanos, apenas representaría el 5 por ciento de todo lo que existe. La hipótesis de la energía oscura ha atraído más atención que la posibilidad de que la gravedad cambie su comportamiento a grandes escalas, ya que explica de manera simple y elegante el proceso de formación de galaxias y grandes estructuras cósmicas y, además, resulta compatible con todos los datos empíricos disponibles hasta la fecha.

Pero ¿cómo asegurarnos de que la expansión acelerada del universo se debe a la energía oscura? Y, si así fuese, ¿cuál es la naturaleza de esta enigmática sustancia? Para responder a tales preguntas, una colaboración internacional de científicos hemos iniciado un ambicioso proyecto, el Sondeo de la Energía Oscura (DES, por sus siglas en inglés). Gracias a él esperamos entender mejor por qué el universo parece estar desgarrándose.

El DES pretende estudiar con una precisión sin precedentes los 14.000 millones de años de expansión cósmica y la historia de formación de las inmensas aglomeraciones de galaxias que se extienden a lo largo y ancho del universo. Al analizar la manera en que estas grandes estructuras se han ido agrupando con el paso del tiempo, esperamos comprender por qué ahora se están separando.

Junto con mis colaboradores del Laboratorio del Acelerador Nacional Fermi y la Universidad de Chicago, así como con otros 300 físicos y astrónomos de 25 instituciones de EE.UU., España, Reino Unido, Brasil, Alemania y Suiza, hemos trabajado para construir la Cámara de la Energía Oscura, el instrumento principal del DES, y para analizar sus datos. El dispositivo se montó en 2012 en un telescopio de cuatro metros de diámetro ubicado en el Observatorio Interamericano de Cerro Tololo, una instalación estadounidense emplazada en la cordillera de los Andes del norte de Chile. Las primeras imágenes llegaron en septiembre de aquel año y la puesta a punto del instrumento se concluyó en los meses posteriores. El 31 de agosto de 2013,

EN SÍNTESIS

En contra de lo esperado, hace unos años se descubrió que el universo se expande a una velocidad cada vez mayor. La causa podría ser un misterioso agente, apodado energía oscura, o una modificación de la gravedad a grandes escalas.

A su vez, la energía oscura podría deberse a la energía del vacío cuántico, o bien a un nuevo tipo de campo, la «quintaesencia». Cada una de estas tres hipótesis implica una evolución pasada del cosmos ligeramente distinta.

Un nuevo proyecto, el Sondeo de la Energía Oscura, estudiará varios fenómenos del universo local y remoto para inferir con gran detalle la tasa de expansión y el agrupamiento de la materia en diferentes épocas cósmicas.

PÁGINAS ANTERIORES: CORTESÍA DE REIDAR HAHN, FERMILAB

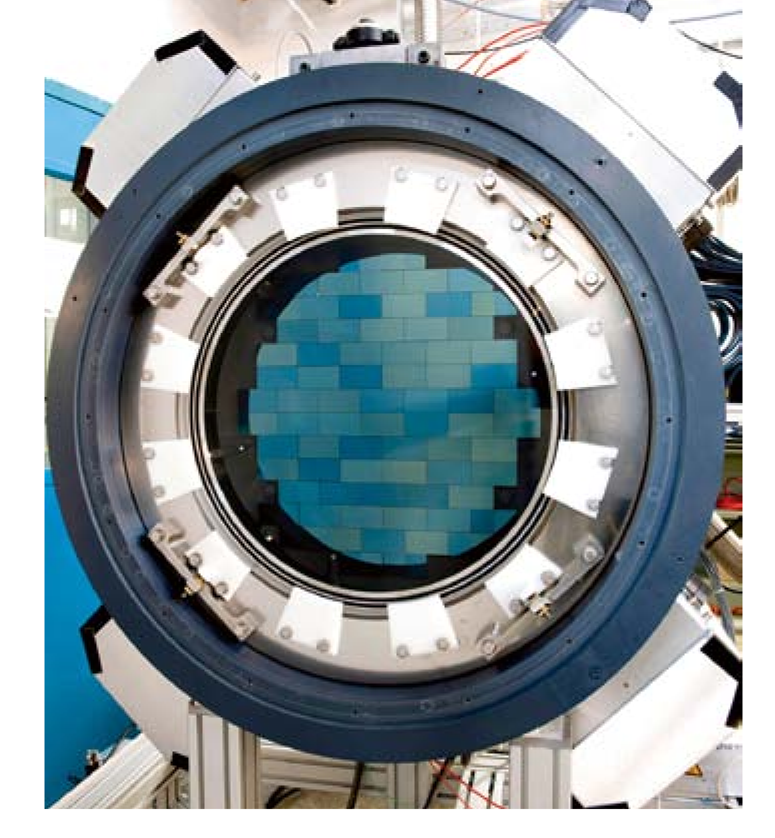
el DES comenzó oficialmente a muestrear una vasta franja de cielo del hemisferio sur. El proyecto, ahora en su tercera temporada, tomará datos entre agosto y febrero durante cinco años consecutivos. Con ellos produciremos un mapa profundo y de alta resolución de unos 200 millones de galaxias dispersas en un octavo del cielo, así como un catálogo de explosiones estelares que nos permitirá trazar la expansión cósmica. Desde su puesta en marcha, el proyecto ya ha acumulado una gran cantidad de datos que en estos momentos se encuentran bajo análisis.

HIPÓTESIS RIVALES

Por fortuna, los mismos indicios que permitirían distinguir entre una fuerza de la gravedad modificada y la energía oscura también deberían clarificar la naturaleza de esta última, si es que existe. El sondeo pondrá a prueba dos de las ideas principales sobre la energía oscura. La explicación más simple tal vez resulte poco intuitiva: que se trate de la energía del espacio vacío. Imagine que tenemos una caja, la vaciamos por completo (extraemos de su interior todos los átomos, radiación, materia oscura, etcétera) y la blindamos de tal modo que nada pueda atravesar sus paredes. Obtendríamos así un vacío perfecto. Según las leyes de la física clásica, el vacío carece de energía. La teoría cuántica, en cambio, nos dice lo contrario. Los físicos piensan en la energía del vacío como debida a pares de partículas y antipartículas «virtuales» que, en todo momento, surgen y se aniquilan sin cesar. Tales partículas dan lugar a las propiedades que cabe esperar de la energía oscura; en particular, podrían explicar la expansión acelerada del cosmos.

Sin embargo, la teoría cuántica predice un valor para la energía del vacío que resulta 120 órdenes de magnitud (es decir, 10^{120} veces) mayor que el que debería adoptar si dicho fenómeno fuese el responsable de la energía oscura. Al resolver un problema matemático, es ciertamente difícil cometer un error semejante. Así pues, movidos en parte por esta discrepancia, los cosmólogos han propuesto otras posibilidades para explicar la energía oscura.

Otra idea propone que la energía oscura tal vez se halle asociada a una partícula elemental aún por descubrir. Esta posibilidad ha recibido en ocasiones el nombre de «quintaesencia». Dicha partícula sería una especie de prima lejana del bosón de Higgs, pero unos 44 órdenes de magnitud más ligera. Para entender su comportamiento, imaginemos que en cada punto del espacio hubiese una canica rodando cuesta abajo. Dicha canica tendría una energía cinética, debida a su movimiento, y una potencial, relacionada con la altura a la que se encuentra (a mayor altura, más energía potencial). A medida que se desliza, disminuye la energía potencial y aumenta la cinética. Si la partícula asociada a la quintaesencia fuese muy liviana, con una masa inferior a los 10^{-33} electronvoltios (a modo de comparación, recordemos que el electrón tiene una masa de 511.000 electronvoltios), entonces hoy estaría rodando muy despacio, con una energía cinética relativamente baja en comparación con la potencial. En tal caso, su efecto sobre la expansión cósmica sería similar, aunque no idéntico, al de la energía del vacío. Una diferencia importante es que, según la mayoría de los modelos de quintaesencia, la aceleración del universo habría comenzado algo más tarde que si la responsable del fenómeno fuese la energía del vacío.



EL SENSOR DE IMAGEN de la Cámara de la Energía Oscura (*arriba*) cuenta con 74 dispositivos de carga acoplada (CCD) que abarcan un amplio campo de visión para sondear el cosmos.

CORTESÍA DE REIDAR HAHN, FERMILAB

CUATRO TESTS

Para discernir entre las posibles causas de la aceleración cósmica, el DES investiga cuatro fenómenos especialmente sensibles a las distintas hipótesis. Dado que cada uno de ellos se encuentra asociado a observaciones de distinto tipo, no se ven afectados por los mismos errores de medida. Esos cuatro tests estudiarán las supernovas de tipo Ia, las ondas acústicas primordiales, las lentes gravitatorias y los cúmulos de galaxias. En conjunto, tales indicadores reflejan la velocidad a la que se ha estado expandiendo el universo a lo largo de su historia y cuánta materia ha ido aglutinándose en cada momento para dar lugar a las estructuras cósmicas a gran escala.

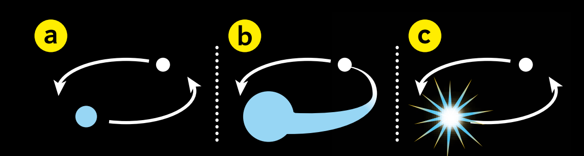
Durante los primeros miles de millones de años posteriores a la gran explosión, la gravedad compitió contra la expansión y generó grandes estructuras. Sin embargo, cuando el universo tenía unos 7000 millones de años, la materia comenzó a estar tan diluida que, con independencia de lo que provocase la expansión acelerada, esta última comenzó a dominar sobre la gravedad. Eso disparó la tasa de expansión y puso fin de manera más o menos gradual a la formación de estructuras. La energía del vacío, la quintaesencia y la gravedad modificada dejan huellas diferentes en la historia de la expansión cósmica y en la forma en que crecieron las grandes agrupaciones de materia. Tales improntas son las que el DES intentará extraer.

SUPERNOVAS

Las supernovas de tipo Ia constituyen una clase muy particular de explosiones estelares. Se desencadenan cuando una enana blanca absorbe materia hasta alcanzar cierto umbral de masa, en cuyo momento se torna inestable y estalla. Dado que el objeto que explota tiene siempre las mismas características, todas las supernovas de esta clase alcanzan una luminosidad máxima muy similar, razón por la que se conocen como «candelas estándar». Por tanto, las diferencias en su brillo aparente solo se deben a

Cuatro huellas de la aceleración cósmica

Para averiguar por qué el universo se está expandiendo cada vez más rápido, el Sondeo de la Energía Oscura (DES) acometerá cuatro tests independientes. Dos de ellos medirán distancias cósmicas (*izquierda*) a fin de averiguar qué tamaño tenía el universo en cada momento y a qué velocidad se estaba expandiendo. Otros dos analizarán la manera en que la materia se fue agrupando en cada época cósmica (*derecha*), lo que permitirá estudiar cómo evolucionó la competición entre la atracción gravitatoria y la expansión acelerada. La tasa de expansión cósmica y el proceso de formación de grandes estructuras habrían progresado de un modo u otro dependiendo del agente causante de la expansión acelerada del cosmos. Una posibilidad es que la aceleración se deba a la energía oscura. Otra hipótesis, sin embargo, postula que, a escalas cósmicas, la fuerza de la gravedad se comportaría de un modo distinto del habitual.



Supernovas de tipo Ia

Estas explosiones estelares se producen cuando una enana blanca absorbe materia de una estrella compañera (a) y su masa aumenta (b) hasta que alcanza un límite en el que se torna inestable y estalla (c). Al explotar, todos estos astros emiten aproximadamente la misma cantidad total de energía, por lo que su brillo aparente (la luz que llega a la Tierra) permite deducir cuán lejos se encuentran. Al observar múltiples supernovas y comparar la distancia a la que se hallan con su desplazamiento al rojo (una magnitud que indica a qué velocidad se alejan de la Tierra), puede obtenerse una estimación de la tasa de expansión del universo en distintas épocas.

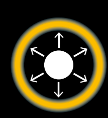
El brillo aparente de la supernova depende de su distancia a la Tierra

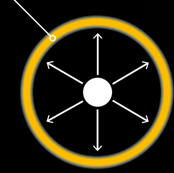
Ondas acústicas primordiales

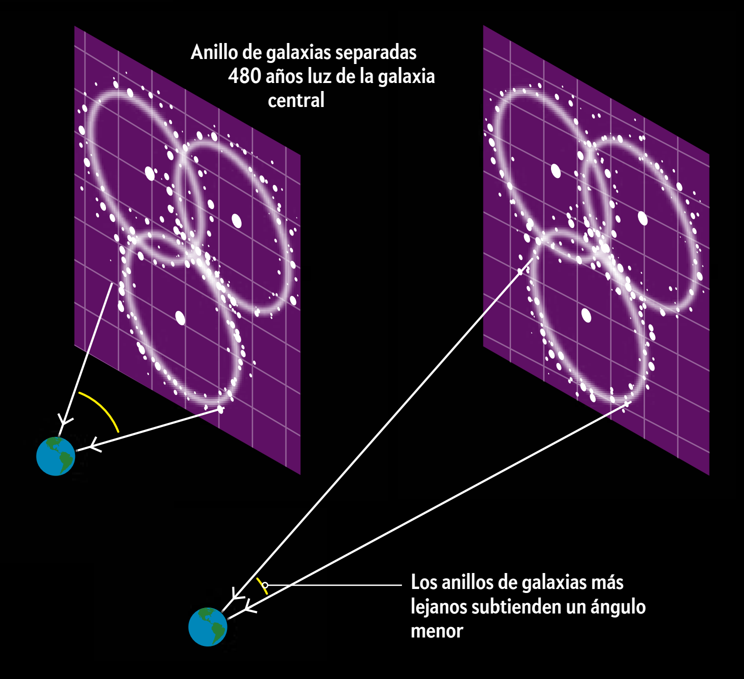
En el plasma caliente del universo primitivo se propagaron ondas acústicas (fluctuaciones de densidad) hasta que el cosmos se enfrió lo suficiente para que protones y electrones se combinasen en átomos neutros. La distancia típica recorrida por dichas ondas hasta ese momento corresponde hoy a unos 480 millones de años luz. En la actualidad, dos galaxias cualesquiera presentan una ligera tendencia a encontrarse separadas por esa distancia. El efecto se manifiesta en un pequeño exceso en el número de galaxias contenidas en una cáscara esférica de 480 millones de años luz de radio y centrada en una galaxia cualquiera. Desde la Tierra, lo que se observa es un aumento en la densidad de galaxias en un anillo alrededor de la galaxia central. Dado que su radio es conocido, el ángulo que subtiende ese anillo en el cielo permite calcular la distancia a la que se encuentran las galaxias. Al compararla con su desplazamiento al rojo puede reconstruirse la expansión del universo.

Distancia recorrida por las ondas acústicas en el universo primitivo (480 años luz en la actualidad)



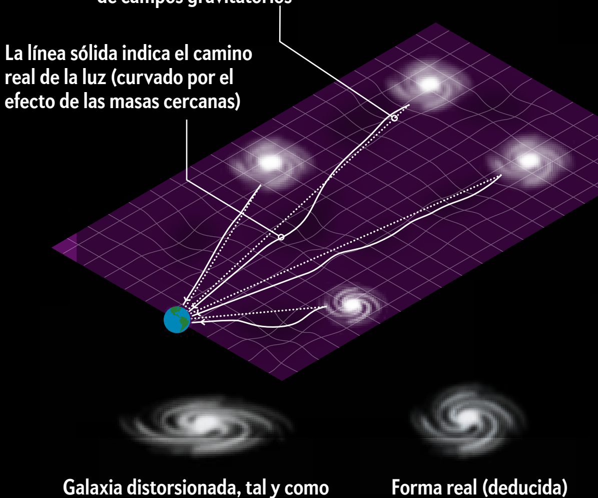






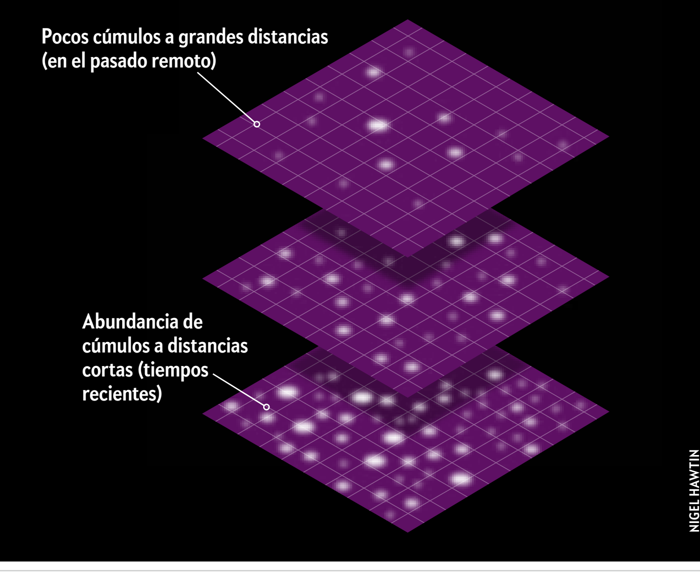
Lentes gravitatorias

La luz procedente de galaxias remotas se desvía a medida que atraviesa el campo gravitatorio producido por la masa que encuentra en su camino. Este fenómeno, conocido como lente gravitatoria, provoca que las galaxias se vean distorsionadas en el telescopio. El DES medirá dicho efecto sobre un gran número de galaxias para confeccionar un mapa de cómo se distribuye la masa en el universo a distintas distancias y, por tanto, en distintas épocas cósmicas.



Cúmulos de galaxias

La gravedad provoca que las galaxias se acumulen, mientras que el agente responsable de la expansión acelerada tiende a separarlas. El DES localizará decenas de miles de cúmulos de galaxias a distancias de miles de millones de años luz. Al comparar su número con la cantidad de cúmulos observada en el universo local, correspondiente a épocas más recientes de la historia cósmica, los expertos esperan deducir a qué ritmo se fueron agrupando las galaxias a lo largo del tiempo.



NIGEL HAWTIN

que unas se encuentran más lejos que otras. Esta característica las convierte en magníficas varas de medir cósmicas. Por ejemplo, si una supernova de tipo Ia brilla 100 veces menos que otra, sabremos que se encuentra 10 veces más lejos (ya que la intensidad luminosa de una fuente disminuye con el cuadrado de la distancia).

El DES observará las mismas zonas del cielo cada pocas noches para medir con precisión la distancia a varios miles de supernovas de tipo Ia, tanto en el universo local como en el lejano. Ese número de supernovas será unas cien veces mayor que el que bastó en 1998 para descubrir la expansión acelerada. También usaremos otros telescopios para comprobar cuánto se ha desplazado la luz de esos astros hacia el extremo rojo del espectro electromagnético. Este fenómeno afecta a cualquier objeto que se aleje a gran velocidad del observador; en el caso de las supernovas, nos indica cuánto se ha estirado la longitud de onda de la luz debido a la expansión cósmica desde el momento en que fue emitida hasta ahora. El desplazamiento al rojo de las supernovas remotas proporciona una medida directa del tamaño relativo del universo en aquel entonces con respecto al actual. Al combinarlo con las estimaciones de la distancia a estos objetos, posibles gracias a su carácter de candelas estándar, el DES podrá reconstruir con un altísimo grado de precisión la expansión del universo durante los últimos 10.000 millones de años.

Tales datos permiten discriminar entre las diferentes teorías sobre la aceleración cósmica, puesto que cada una de ellas da lugar a una historia del universo ligeramente distinta. Si, por ejemplo, el agente responsable fuese la quintaesencia, según la mayoría de los modelos la expansión acelerada habría comenzado algo más tarde y lo habría hecho de manera más gradual que si la aceleración se debiese a la energía del vacío. Si el fenómeno obedece a la existencia de una partícula similar al bosón de Higgs, las supernovas con un desplazamiento al rojo determinado aparecerán más brillantes (se encontrarán más cerca) de lo que cabría esperar si la causa fuese la energía del vacío. Por otro lado, si la gravedad no funcionase como habíamos creído hasta ahora, sus efectos también deberían verse en las propiedades de las supernovas lejanas, si bien en este caso los detalles dependerían del tipo concreto de modificación que considerásemos.

Se requiere una precisión exquisita para discernir entre las distintas hipótesis, ya que sus predicciones se apartan muy poco unas de otras. En concreto, deberíamos determinar la relación entre distancia y desplazamiento al rojo con una precisión del orden del uno por ciento. Un hito que, por primera vez en la historia, se encuentra al alcance de la Cámara de la Energía Oscura.

ONDAS ACÚSTICAS PRIMORDIALES

El DES también se valdrá de una reliquia del universo primitivo para estudiar su expansión. Durante los primeros cientos de miles de años de vida del cosmos, la gravedad tendía a juntar la materia, mientras que la presión de la radiación electromagnética (la luz) ejercía el efecto contrario. Aquella competición entre ambas fuerzas generó ondas de acústicas en el plasma primordial. Sin embargo, cuando este se enfrió lo suficiente para formar átomos neutros, la materia y la radiación dejaron de interaccionar, por lo que dicha competición cesó. La distancia viajada por las ondas acústicas hasta aquel momento, que en la actualidad corresponde a unos 480 millones de años luz, dejó su impronta en la distribución espacial de galaxias. En concreto, dos galaxias cualesquiera presentan una ligera tendencia estadística a hallarse separadas por esa distancia en comparación con otros valores.

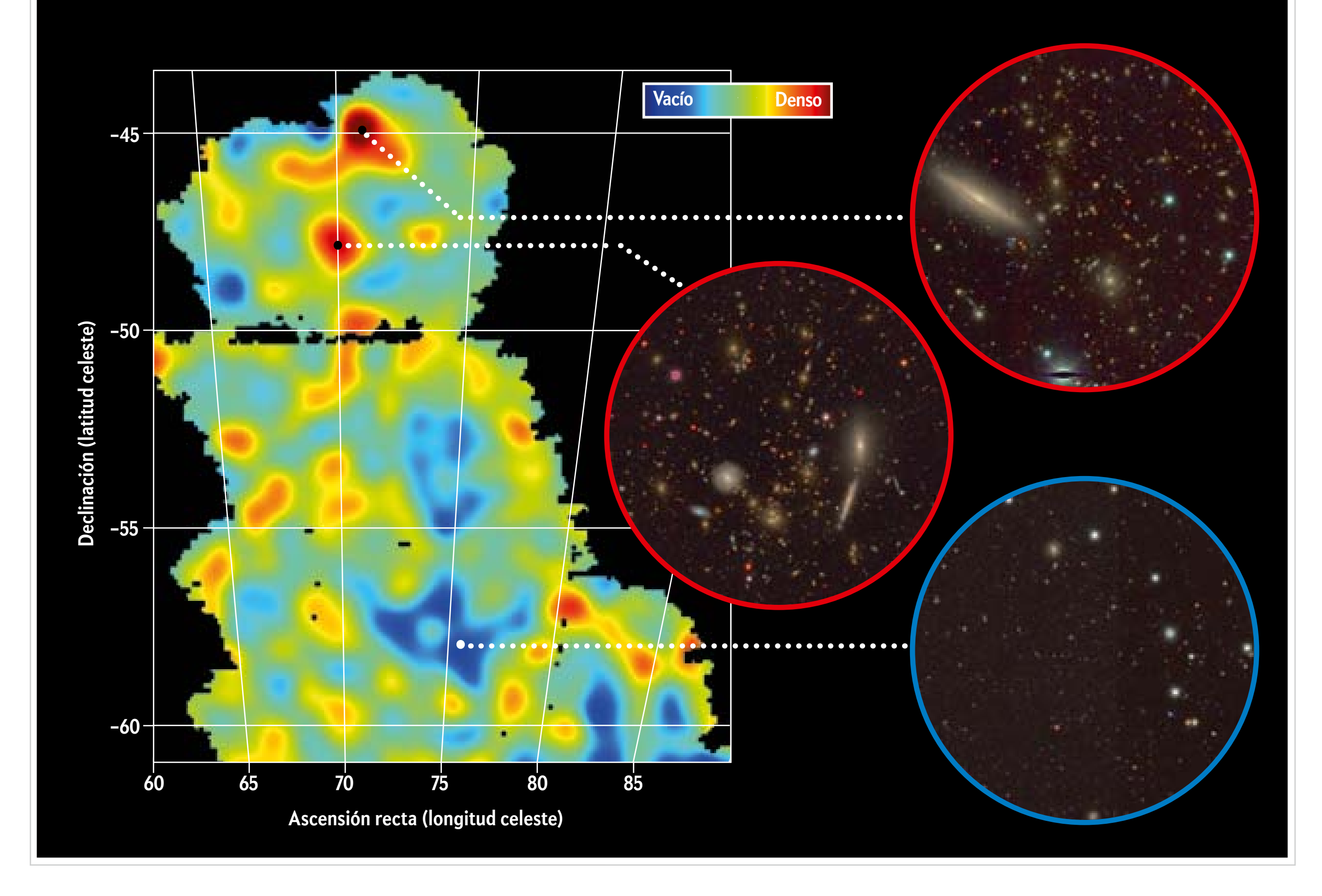
La escala de tales «oscilaciones acústicas bariónicas» (BAO, por sus siglas en inglés) nos proporciona una regla estándar cósmica para medir distancias. También nos permite inferir la historia de la expansión del universo, ya que, si conocemos el tamaño físico de una

PRIMEROS RESULTADOS

La masa en el cosmos

Este mapa muestra la distribución de masa en una región de cielo de unos 139 grados cuadrados (unas 650 veces mayor que la luna llena). Las regiones rojas representan zonas con una densidad mayor que la media; las azules indican espacios más vacíos. Para elaborar esta imagen, el DES se basó en el efecto de lente gravitatoria causado tanto por la materia ordinaria como por la oscura.

Las fotografías de la derecha, obtenidas con la Cámara de la Energía Oscura, muestran con detalle tres de las regiones del mapa de masas. Los círculos rojos, correspondientes a zonas de alta densidad, presentan un elevado número de galaxias brillantes; el azul contiene menos, puesto que pertenece a una región en la que la densidad media de masa resulta inferior.



regla (en este caso, una separación entre galaxias de 480 millones de años luz) y medimos su tamaño aparente en el cielo (el ángulo que subtienden esas mismas galaxias) podremos calcular cuán lejos se encuentra. Nuestro proyecto estudiará este efecto en unos 200 millones de galaxias, gracias a lo cual seremos capaces de reconstruir la relación entre distancia y desplazamiento al rojo, al igual que en el caso de las supernovas. Si la aceleración cósmica se debiese a la quintaesencia, las galaxias con un desplazamiento al rojo dado deberían encontrarse más cerca que si la causante fuese la energía del vacío y la aceleración hubiese comenzado más tarde. En caso de que la energía oscura no existiese, esperaríamos observar una relación entre el desplazamiento al rojo y la distancia diferente de la que auguran los otros dos escenarios, si bien los detalles dependerán de la forma en que se altere el comportamiento de la gravedad.

LENTES GRAVITATORIAS

Este método se basa en una de las predicciones de la teoría de la relatividad general de Einstein. Según esta, los rayos de luz procedentes de galaxias lejanas se curvan al atravesar el campo gravitatorio generado por la materia interpuesta en el camino. Esa desviación de la luz distorsiona las imágenes de las galaxias, efecto que recibe el nombre de lente gravitatoria. Cuando la trayectoria de la luz se ve muy alterada, el fenómeno da lugar a imágenes espectaculares: las galaxias distantes pueden aparecer como arcos de luz finos y extendidos, llegándose a ver en ocasiones varias imágenes del mismo objeto. En la mayoría de los casos, sin embargo, los rayos solo se curvan de manera leve, lo que genera pequeñas distorsiones que no resultan apreciables a simple vista. Este fenómeno se conoce como lente gravitatoria «débil».

Los rayos provenientes de galaxias que se encuentran igual de lejos, próximas entre sí en el cielo, sufren desviaciones muy similares, ya que en su viaje hasta la Tierra han atravesado prácticamente las mismas regiones de materia. Al estudiar la forma de un gran número de galaxias contenidas en una pequeña región del cielo, resulta posible deducir cuánto se han distorsionado las imágenes y, con ello, el grado de agrupamiento de la materia a lo largo de la línea de visión, por más que cada galaxia apenas

CORTESÍA DE JOE ZUNTZ, MICHAEL TROXEL Y COLABORACIÓN DES *(mapa e imágenes de galaxias)*

se vea distorsionada. Repetir tales medidas en diferentes zonas del firmamento permite inferir el modo en que la materia se aglomera en el universo. Puesto que la evolución temporal de la agrupación de materia refleja la competición entre la gravedad y la energía oscura, y es también sensible a las posibles modificaciones de la gravedad, su estudio debería ayudarnos a entender qué provoca la expansión acelerada del universo.

Para medir el efecto de lente débil, el DES estudiará la forma de unos 200 millones de galaxias, una cifra veinte veces superior que la cubierta por los estudios precedentes, y en un área del cielo mucho más extensa. De esta manera, obtendrá el mapa más preciso hasta la fecha de la distribución de materia a diferentes distancias y, por tanto, en distintas épocas cósmicas (ya que, cuanto más lejos se halla una fuente de la Tierra, más tarda su luz en llegar hasta nosotros y más atrás nos remontamos en el tiempo al observarla).

Ese mapa debería cambiar dependiendo de quién esté detrás de la expansión acelerada del universo. Dado que, gracias a las observaciones, ya conocemos el grado de agrupamiento de la materia en el universo actual, si el responsable de la aceleración cósmica fuese la quintaesencia, esperaríamos ver una mayor aglomeración en el universo joven que si el causante fuese la energía del vacío. Este efecto tal vez sorprenda a primera vista, ya que la energía oscura tiende a reducir la eficiencia de la atracción gravitatoria. Sin embargo, para que, tras miles de millones de años de expansión, el universo presente la cantidad de estructuras que observamos hoy, la materia tuvo que comenzar a aglomerarse desde una época muy temprana. Si no hubiese energía oscura, una fuerza de la gravedad modificada habría dado lugar a distintas formas de agrupamiento de la materia a lo largo del tiempo. En tal caso, la cantidad de estructura presente en el universo primitivo podría ser mayor o menor, dependiendo de la formulación exacta de las leyes de la gravedad.

CÚMULOS DE GALAXIAS

Por último, para reconstruir el proceso de formación de grandes estructuras a lo largo del tiempo, el DES rastreará el cielo en busca de cúmulos de galaxias. Estos objetos, cuyas masas pueden llegar a superar los mil billones (10^{15}) de soles, constituyen los sistemas ligados por la gravedad más grandes del universo. Para formarse hubieron de vencer la repulsión causada por la energía oscura o la gravedad modificada. A diferencia de los anteriores cartografiados cósmicos de este tipo, limitados a regiones del cielo menores, el DES espera descubrir decenas de miles de cúmulos a distancias de miles de millones de años luz.

Los científicos compararán entonces el número de cúmulos que se observan cerca de la Vía Láctea (pertenecientes a la época cósmica actual) con los correspondientes al pasado remoto. De manera análoga a lo que ocurre con las lentes gravitatorias, esperaríamos ver más cúmulos en el universo primitivo si la causa de la aceleración cósmica fuese la quintaesencia que si se tratase de la energía del vacío (suponiendo que los demás factores se mantienen idénticos), o bien un comportamiento distinto, tal vez más complejo, si todo se debiese a una interacción gravitatoria modificada.

UN INSTRUMENTO PUNTERO

El instrumento principal del DES es la cámara más potente que jamás se haya construido para estudiar estos fenómenos. Instalada en el Telescopio Víctor M. Blanco, la Cámara de la Energía Oscura ha sido diseñada para cartografiar objetos de diverso tipo, como galaxias, cúmulos y supernovas, en el menor tiempo posible. Con sus 570 megapíxeles, este aparato ultrasensible abarca un amplio campo de visión gracias a cinco grandes lentes, las cuales lo convierten en un instrumento ideal para sondear una ancha franja de cielo en una sola toma.

Desde que comenzara oficialmente su andadura en agosto de 2013, el muestreo ha cubierto ya cerca de 5000 grados cuadrados de firmamento y ha obtenido imágenes en color de unos 100 millones de galaxias. Hasta ahora, el sondeo de supernovas de tipo Ia ha encontrado más de un millar de objetos de esta clase. En estos momentos se están analizando los datos para deducir la distancia a ellos y estudiarla en función de su desplazamiento al rojo. También estamos midiendo la forma de las galaxias para estimar el efecto de lente débil, identificando cúmulos de galaxias lejanos y analizando la distribución espacial de galaxias para extraer la huella de las oscilaciones acústicas bariónicas. Dentro de aproximadamente un año, la primera fase de este análisis debería estar completa, lo que nos permitirá comenzar a buscar indicios sobre el agente responsable de la expansión acelerada del universo.

Mientras tanto, el proyecto ya ha aportado algunos resultados de interés para la astrofísica. Entre ellos cabe destacar el hallazgo de 16 nuevas candidatas a galaxias enanas ultradébiles en las inmediaciones de la Vía Láctea. Estos sistemas, con apenas unas decenas de estrellas, se encuentran entre los objetos con mayor proporción de materia oscura del universo. Su baja luminosidad los hace muy difíciles de detectar, pero revisten un gran interés debido a que desempeñan un papel fundamental en el ensamblaje de las galaxias de mayor tamaño, como la nuestra, y también porque constituyen dianas ideales para estudiar la naturaleza de la materia oscura [*véase* «Galaxias enanas y materia oscura», por Pavel Kroupa y Marcel Pawlowski; Investigación y Ciencia, marzo de 2011 *y* «Galaxias enanas en la red cósmica», por Noam I. Libeskind; Investigación y Ciencia, mayo de 2014].

El DES se encuentra constantemente tomando datos. Mientras usted lee estas líneas, los expertos están analizando las observaciones en busca de indicios sobre la naturaleza de la energía oscura. Aún es pronto para decidir si el DES podrá responder de manera concluyente a la pregunta de si la aceleración de la expansión cósmica se debe a la energía oscura o a una gravedad modificada, o si la primera corresponde a la energía del vacío o la quintaesencia. Pero, a pesar de todo, creemos que este proyecto representará el siguiente paso en nuestros intentos por entender qué causa que el universo se esté expandiendo cada vez más rápido.

PARA SABER MÁS

Eight new Milky Way companions discovered in first-year Dark Energy Survey data. K. Bechtol et al. en *Astrophysical Journal*, vol. 807, n.º 1, art. 50, 1 de julio de 2015.

Wide-field weak lensing mass maps from Dark Energy Survey science verification data. C. Chang et al. en *Physical Review Letters*, vol. 115, n.º 5, art. 051301, 31 de julio de 2015.

Página web del Sondeo de la Energía Oscura: **www.darkenergysurvey.org**

EN NUESTRO ARCHIVO

El universo y su quintaesencia. Jeremiah P. Ostriker y Paul J. Steinhardt en *IyC*, marzo de 2001.

Cuando la aceleración cambió de signo. Adam G. Riess y Michael S. Turner en *IyC*, abril de 2004.

La constante cosmológica. Lawrence M. Krauss y Michael S. Turner en *IyC*, noviembre de 2004.

La mano invisible del universo. Christopher J. Conselice en *IyC*, abril de 2007.

por José L. Viejo Montesinos, José González Granados y Carlos Gómez de Aizpurua

Diversidad y hábitat de los lepidópteros

La variedad de estos insectos depende de la composición y estructura de la vegetación de la que se alimentan

Los lepidópteros son un orden de insectos de enorme diversidad taxonómica. Se han descrito unas 155.000 especies, la mayoría de ellas fitófagas, tanto en su fase adulta de mariposa (o imago), cuya alimentación es a base de néctar, como en la larvaria. Las larvas, u orugas, suelen mostrar una marcada oligofagia, esto es, se nutren de un grupo reducido de plantas pertenecientes a la misma familia botánica o a familias afines. Este rasgo es el resultado de un largo proceso coevolutivo, en el que las plantas desarrollaron mecanismos defensivos (muchas veces de tipo químico) y los fitófagos contramedidas que intentaban sortear las defensas vegetales.

La riqueza en especies de lepidópteros depende no solo del tipo de formación vegetal en la que viven y se alimentan, sea un bosque o un matorral, sino también del estado de conservación de esta. En concreto, nuestro equipo ha comprobado que la diversidad de estos insectos aumenta con la heterogeneidad estructural de la vegetación. Cuanta mayor variedad de formas, tamaños y morfologías complejas presente esta, mayor número de especies albergará.

Durante tres años hemos estudiado la fauna de lepidópteros de Las Marismillas, un paraje situado en el extremo sudoriental del Parque Nacional de Doñana. La zona reviste especial interés porque en una superficie relativamente pequeña se concentra la mayoría de las formaciones vegetales más relevantes de Doñana: pinares, sabinares y lentiscares, así como adelfares, juncales y pastizales. Los resultados preliminares nos han permitido conocer el ciclo biológico, las plantas nutricias y la fenología de un total de 78 taxones de lepidópteros. Hemos observado así que el jaguarzo (*Halimium halimifolium*) es una de las plantas que más especies soporta; otras plantas de gran interés por su fauna de lepidópteros son el torvisco (*Daphne gnidium*), la siempreviva (*Helichrysum picardii*), el lentisco (*Pistacia lentiscus*), la clavellina (*Armeria pungens*) y el almarjo (*Suaeda vera*). La amplia diversidad vegetal de la que dependen los lepidópteros pone de relieve la necesidad de una conservación integrada de las formaciones vegetales que constituyen su hábitat.

—José Luis Viejo Montesinos
Dpto. biología, Universidad Autónoma de Madrid
—José González Granados
Parque Regional del Sureste, Comunidad de Madrid
—Carlos Gómez de Aizpurua
Sociedad Hispano-Luso-Americana de Lepidopterología





LAS MATAS de clavellina (*flores malva*) de Las Marismillas, en el Parque Nacional de Doñana, conforman uno de los hábitats preferidos de los lepidópteros. Allí muestrea sus larvas uno de los autores (J. González Granados).



LAS LARVAS de *Hyles euphorbiae* (Linnaeus, 1758) son muy voraces y cuando llegan a su máximo desarrollo tienen unos colores muy llamativos. Se nutren de lechetreznas como *Euphorbia baetica* (*izquierda*). El imago, la última fase de desarrollo del insecto, tiene las alas anteriores rosa y pardo; las posteriores, rosa intenso, negro y blanco (*arriba*).

LAS HOJAS DE OLMO son uno de los alimentos principales de las larvas de *Saturnia pavonia josephinae* (Schawerda, 1924) (*derecha*). A la izquierda, imago.

LAS ORUGAS de *Eutelia adulatrix* (Hübner, 1813), de color verde claro intenso, pasan inadvertidas para los depredadores entre los brotes nuevos del lentisco (*izquierda e imagen de fondo*), como también sus imagos de manchas grises y pardas sobre el sustrato rocoso (*derecha*).

por Telmo Pievani

Telmo Pievani es profesor asociado de filosofía de las ciencias biológicas en la Universidad de Padua.



Repensar a Darwin

¿Qué procesos deben considerarse esenciales para explicar la evolución? Un debate entre algunos de los principales biólogos evolutivos contemporáneos

En octubre de 2014, la revista científica *Nature* tituló así uno de sus artículos de comentario: «¿La teoría de la evolución necesita un replanteamiento?». La noticia era esta: los investigadores están divididos sobre qué procesos deben ser considerados esenciales para explicar la evolución. Música para los oídos de los que creen, errónea e inútilmente, que, en ciencia, las divisiones son un signo de debilidad.

El artículo citado presenta los argumentos divididos precisamente por la mitad, en dos columnas contrapuestas: a la izquierda, los de los rivales —sí, el neodarwinismo necesita una reforma urgente—; a la derecha, los de los defensores —no, así está todo bien—. Parece un debate televisivo, pero no lo es. Las firmas distribuidas en la parte inferior de las dos columnas corresponden a ilustres biólogos evolutivos al frente de algunos de los principales laboratorios del mundo. Se halla en juego una herencia pesada, que ha dado mucho que hablar desde hace un siglo y medio: la de Charles R. Darwin. Sus numerosos detractores están impacientes por apartarlo de la circulación, pero ¿habrá llegado realmente el momento de hacerlo?

El reto de los reformistas

Los primeros, llamémosles «reformistas», coordinados por el etólogo Kevin Laland, de la Universidad de St. Andrews, con la colaboración, entre otros, de Tobias Uller, zoólogo de la Universidad de Oxford, y Armin Moczek, biólogo de la Universidad de Indiana, sostienen la necesidad de construir una «síntesis evolutiva extendida», es decir, una teoría que no se limite a explicar la evolución solo a través de los genes y la selección. En realidad, en los últimos veinte años se han acumulado descubrimientos ahora insoslayables que muestran que no todo el juego evolutivo es de tipo genético y selectivo. En particular, la plasticidad fenotípica y de desarrollo (morfologías y comportamientos que cambian al variar las circunstancias ambientales, sin modificaciones genéticas) constituye una estrategia adaptativa poderosa y generalizada que también puede causar la diversificación de las especies. Algunas de estas variaciones en la expresión y la regulación de los genes (inducidas por el ambiente y sin cambios en el ADN, es decir, epigenéticas) son estabilizadas luego por la selección y pueden ser transmitidas a lo largo de varias generaciones. Primero viene el carácter morfológico plástico y luego su incorporación genética, y no al contrario, como en la teoría estándar.

ON

THE ORIGIN OF SPECIES

BY MEANS OF NATURAL SELECTION,

OR THE

PRESERVATION OF FAVOURED RACES IN THE STRUGGLE FOR LIFE.

By CHARLES DARWIN, M.A.,

LONDON:
JOHN MURRAY, ALBEMARLE STREET.
1859.

EL ORIGEN DE LAS ESPECIES, libro publicado en 1859 en el que Darwin introdujo el concepto de selección natural.

WIKIMEDIA COMMONS/DOMINIO PÚBLICO

La misma variación genética no parece ser del todo casual: las limitaciones de desarrollo la condicionan y en circunstancias cruciales la evolución ha actuado precisamente en los procesos de desarrollo. El material que se ve afectado por la selección no está determinado solo por pequeñas mutaciones genéticas espontáneas. Más bien, la selección encuentra en cada caso compromisos con limitaciones internas y vías de desarrollo que no solo tienen un valor negativo, sino que orientan la evolución en sentido positivo, generando innovaciones cruciales. En estas ideas se nota la mano de Gerd B. Müller, coautor del artículo publicado en *Nature* y uno de los máximos exponentes de la biología evolutiva del desarrollo. Los procesos mediante los cuales los organismos crecen y se desarrollan son causas activas de evolución y especiación. El desarrollo guía las formas de los organismos a lo largo de senderos privilegiados.

La misma actividad de los organismos (construir un termitero, fabricar una presa en el río, evolucionar cultural y técnicamente) modifica el nicho ecológico, lo que afecta a los recursos naturales y a las presiones selectivas que, a su vez, retroalimentan a los organismos. Se genera un fenómeno recurrente llamado «construcción de nicho» que, según los reformistas, entre los que se encuentran John Odling-Smee, de la Universidad de Oxford, y Marc Feldman, de la Universidad Stanford, junto con Laland, defensores a ultranza del modelo en 2003, es fundamental. Los organismos modifican activamente el medio y, a su vez, el medio modifica selectivamente a los organismos. De modo que el organismo constituye un sujeto activo que codirige su propia evolución al modificar sistemáticamente el ambiente e influir así en la selección. De esta manera, una población biológica

hereda de la generación anterior no solo un paquete de genes, sino también un nicho ecológico modificado. La herencia es, por tanto, inclusiva y múltiple: genética, epigenética, ecológica y cultural, y aquí radica la contribución de Eva Jablonka, de la Universidad de Tel Aviv, otra coautora del artículo de *Nature*.

Si bien el punto de vista de Laland y sus colegas está muy centrado en el organismo como punto de apoyo del cambio evolutivo, la posición de la parte contraria es tildada de «genocéntrica» y demasiado cerrada. Según la teoría estándar, para que un proceso sea evolutivo debe afectar a los genes y su transmisión; de no ser así, es marginal. Sin embargo, los genes no lo son todo. Hay que abrirse a una concepción más pluralista de la evolución, si no queremos dejar de lado procesos fundamentales. Según los reformistas, los fenómenos hasta ahora descuidados (plasticidad, construcción de nichos, vías de desarrollo) ejercen un impacto teórico que puede resultar perturbador, ya que son la causa, y no solo el resultado, de la evolución y cambian los modelos, las predicciones y la lógica explicativa de la teoría evolutiva. Darwin no tiene ninguna culpa —ni siquiera conocía la existencia de los genes y, además, describió un proceso tan importante como la selección natural—, pero ahora es el momento de ir más allá.

La reacción conservadora

La respuesta de los «conservadores», coordinados por el biólogo Gregory A. Wray, de la Universidad Duke, y la zoóloga Hopi E. Hoekstra, del Museo de Zoología Comparada de la Universidad Harvard, con la colaboración, entre otros, de los biólogos evolutivos Douglas J. Futuyma, de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, y Richard E. Lenski, de la Universidad estatal de Michigan, parece reflejar el esquema clásico de reacción inducido por las novedades científicas: no es cierto (primera fase); aunque sea cierto, es una cuestión secundaria (segunda fase); es cierto, pero yo ya lo había dicho (tercera fase).

A la primera fase de la reacción podemos atribuirle contrapuntos directos: es falso que el enfoque genecéntrico sea estático y monolítico porque, si nos fijamos en la bibliografía existente, en conjunto sigue siendo el que produce más explicaciones, predicciones y modelos potentes, como lo ha hecho durante décadas gracias a sus métodos cuantitativos rigurosos. Se ha documentado con todo detalle la base genética de numerosas adaptaciones, desde las bacterias hasta la especie humana. La plasticidad fenotípica y las variaciones epigenéticas se han estudiado durante largo tiempo y, en cualquier caso, tienen una base genética, que ha evolucionado de manera diferente de especie a especie: al final se vuelve siempre al mismo punto, a los cambios en el material hereditario.

Ese es el caso citado de la asimilación genética, un modelo formulado en 1959 por el biólogo del desarrollo Conrad Waddington: algunos cambios plásticos en el fenotipo de individuos de la mosca del vinagre sometidos a estrés térmico se vuelven hereditarios si el estrés ambiental persiste. ¿No es eso volver a Lamarck? No exactamente. Waddington ya había buscado una explicación compatible con la teoría de Darwin. Según algunos experimentos recientes, el fenómeno se produciría porque las proteínas del estrés térmico activan los transposones, elementos móviles del genoma que, actuando en cascada, generan muchísimas mutaciones, entre las que se encuentran también las correspondientes al fenotipo inducido por el ambiente, por lo que se seleccionan conjuntamente las variantes fenotípicas inducidas y las variantes ocasionadas por mutaciones al azar. Es un mecanismo conocido como «efecto Baldwin», cuya base molecular finalmente se conoce. Y ofrece un ejemplo excelente de un fenómeno empírico real, aunque quizá raro (modificaciones epigenéticas inducidas por el ambiente que pueden llegar a ser hereditarias en determinadas circunstancias), cuya explicación, sin embargo, no implica ninguna subversión teórica.

El debate demuestra que la comunidad de los evolucionistas mantiene su espíritu autocrítico: donde hay una discusión abierta, la ciencia prospera y genera nuevas preguntas

A la segunda fase de reacción podemos atribuirle la normalización de descubrimientos erróneamente considerados perturbadores. No tiene nada de sorprendente que un gran número de mutaciones genéticas sean neutras con respecto a la selección: en el espectro estadístico de los efectos de las variaciones, desde los más perjudiciales a los más ventajosos, en el medio se encuentra la mayoría de las variaciones con efectos poco importantes o sin ningún efecto. Las limitaciones al desarrollo son reales e importantes, pero son precisamente eso, limitaciones: limitan la variación de los rasgos y las posibles formas, afectando al modo en que opera la selección, pero no son una explicación alternativa de las adaptaciones. Sin embargo, los cambios importantes que han ocurrido en el pasado en los sistemas de desarrollo de los animales, así como la mayor o menor plasticidad y capacidad de evolucionar (evolucionabilidad) de una especie, tenían un valor adaptativo seleccionado por vía genética; de lo contrario, no habrían perdurado. En pocas palabras, dan su justo valor a las imperfecciones y las redundancias: todo tiene que pasar tarde o temprano por el cedazo de la selección natural.

A la tercera fase de reacción pertenece, finalmente, el reconocimiento de la importancia de los fenómenos indicados por los reformistas: la plasticidad fenotípica, la herencia inclusiva, la construcción de nichos y las vías del desarrollo son procesos reales, apoyados por los datos ahora incontrovertibles. «Nosotros también los estamos estudiando», afirman, casi como queriendo apropiarse de ellos.

Sin embargo, y aquí está el punto de apoyo de la divergencia entre los dos enfoques, esos avances en la investigación, junto con otros que los conservadores añaden como igualmente relevantes, se interpretarán como expansiones coherentes del programa estándar de investigación evolutiva neodarwinista, y no como una subversión radical de sus cimientos teóricos. La construcción de nichos ya está presente en el último libro de Darwin sobre las lombrices de tierra (*The formation of vegetable mould through the action of worms, with observations on their habits*), publicado en 1881. La plasticidad fenotípica aparece desde hace tiempo en todos los manuales de la disciplina. Se trata, en definitiva, de «añadidos» no esenciales que, si bien extienden el poder explicativo de la teoría evolutiva, mantienen la firmeza de su núcleo central formado por las variaciones genéticas y la selección.



PLASTICIDAD FENOTÍPICA: La mariposa *Precis octavia sesamus* desarrolla distintos colores en invierno (*izquierda*) y en verano (*abajo*).

En última instancia, la teoría evolutiva estándar funciona muy bien precisamente porque siempre ha sido capaz de incorporar novedades y extensiones procedentes de diferentes campos, poniendo a prueba cada vez «el valor de mercado de las teorías rigurosas, de los resultados empíricos y de la discusión crítica». Por tanto, podemos suponer que los interesados rechazarían la etiqueta de «conservador» (además de los ya citados, también se encuentran en este grupo la genetista Trudy F. C. Mackay, de la Universidad estatal de Carolina del Norte, el ecólogo Dolph Schluter, de la Universidad de la Columbia Británica, y la bióloga Joan E. Strassmann, de la Universidad de Washington en Saint Louis). No puede faltar una referencia final al padre fundador: «Creemos que Darwin lo aprobaría».

Los límites de una disputa

En ese duelo a la sombra de Darwin no es obligatorio ponerse del lado de los unos o de los otros. Aunque entre sus signatarios se encuentre un filósofo de la biología como Kim Sterelny, de la Universidad Nacional de Australia, la «síntesis evolutiva extendida» propuesta por los reformistas no tiene aún una estructura coherente: es una suma de los procesos observados, importantes aunque a veces exagerados, sin un hilo conductor. El único elemento aglutinante que surge es la oposición al reduccionismo genético, pero luchar contra el fantasma algo caricaturesco del genocentrismo y centrar todo en el organismo no basta para definir una nueva teoría de la evolución. Ciertas afirmaciones están poco argumentadas: por ejemplo, no explican cómo sus limitaciones «creativas» de desarrollo pueden generar también «adaptaciones». Nada o casi nada se dice sobre los factores macroevolutivos. Poco generosa parece también la acusación que se hace a los evolucionistas «convencionales» de estar atrincherados en sus posiciones para defender la financiación y por temor a que cualquier crítica pueda ser instrumentalizada por los fanáticos del diseño inteligente.

En la respuesta de los conservadores, en cambio, se percibe cierta pereza teórica, como si bastase con defender la inclusividad de la vieja «síntesis moderna» del siglo xx para hacer avanzar el conocimiento en el campo de la evolución: cualquier fenómeno significativo desde el punto de vista evolutivo se atribuye en última instancia a la genética de poblaciones, a la selección natural, sexual y de parentesco. Y, aunque se reconoce todo lo demás, no se considera esencial. Si bien los oponentes se encuentran todavía en la etapa del movimiento de protesta, sin un marco unificador real, el contrapunto de los conservadores está demasiado a la defensiva, con una llamada a la unidad y a evitar divisiones inútiles. Las lecciones sobre la metodología se repiten hasta la saciedad: al principio y al final advierten de que hay que acumular pruebas, como lo hacía Darwin pacientemente, antes de pensar que se cuenta con una verdadera novedad —como si las de los otros fuesen solo especulaciones con poca base, aunque hayan admitido poco antes lo contrario—. El argumento del «nosotros ya lo habíamos dicho» o «Darwin ya lo había dicho» no es concluyente: siempre se puede encontrar a alguien que haya anticipado una intuición, pero luego esa idea se formaliza y valora. Si en este caso no se ha hecho, es porque no se ha entendido su importancia, debido a una teoría demasiado restringida.

El futuro de la teoría evolutiva

La puesta en escena de las dos escuelas de pensamiento por parte de *Nature* podría sugerir que la comunidad científica está en realidad dividida a partes iguales entre reformistas y conservadores, pero no es así. Cada grupo presenta en su interior muchas facetas, y en el exterior no faltan nunca los disidentes que proponen «teorías de la evolución» heterodoxas. Algunos genetistas ilustres, como Masatoshi Nei, de la Universidad estatal de Pensilvania, vuelven a descubrir, por ejemplo, el mutacionismo de principios del siglo xx y vuelven a afirmar que la evolución está impulsada principalmente por mutacio-

nes genéticas, mientras que la selección tendría un papel marginal. En su libro de 2013 *Mutation-driven evolution*, el creador de la «distancia genética estándar» y uno de los padres de la biología evolutiva molecular afirma que serían directamente los cambios en el ADN y las limitaciones moleculares los que dictarían las innovaciones evolutivas, por no mencionar la ecología y lo que sucede fuera del genoma. Sin embargo, mientras se considere la evolución desde un solo punto de vista (aquel en el que se ha trabajado en la propia carrera profesional, que en el caso de Nei son las moléculas), la articulación de los procesos evolutivos a diferentes niveles escapará a la comprensión y la confusión teórica lo dominará todo.

El debate demuestra, como mínimo, que la comunidad de los evolucionistas mantiene su espíritu autocrítico: donde hay una discusión abierta, la ciencia prospera y genera nuevas preguntas. Es algo que deben aceptar los observadores interesados, neocreacionistas y antidarwinianos incansables, que interpretan maliciosamente estos debates, como si anunciasen el ocaso de la revolución darwiniana. La combinación de variaciones (genéticas y no genéticas) y procesos selectivos no es una teoría, es un hecho corroborado más allá de cualquier duda razonable en todas las áreas de las disciplinas evolutivas. Reformistas y conservadores, en sus laboratorios y en el campo, estudian presiones selectivas. En este sentido, no podemos decir que no somos darwinianos. El punto de controversia es, en todo caso, cómo actualizar y ampliar el núcleo central de la herencia darwiniana.

Y no basta con enumerar los nuevos procesos o, por el contrario, atrincherarse tras un improbable «así va bien». Hay que comprender qué esquemas explicativos son ahora parte del núcleo esencial del programa de investigación evolutiva (fuentes de variación, procesos de selección de varios tipos, deriva genética y otros fenómenos no selectivos, flujos de genes y factores macroevolutivos) y cuáles son parte del marco externo formado por problemas abiertos y no esenciales, redefiniciones, integraciones (¿En qué casos y en cuántos se produce la especiación de manera gradual o puntual? ¿En qué niveles actúa la selección, en los genes, en los organismos, en los grupos?). Por tanto, se presenta una gran cantidad de trabajo para los próximos años. En este campo fascinante de la investigación básica, que va de las moléculas a los fósiles e intenta comprender de dónde venimos y cómo ha evolucionado la vida en la Tierra, el fermento intelectual nunca se queda aletargado. La futura teoría de la evolución está ya construyéndose.

PARA SABER MÁS

The extended synthesis. Dirigido por M. Pigliucci y G. B. Müller. MIT Press, Boston, 2010.

Mutation-driven evolution. M. Nei, Oxford University Press, Oxford, 2013.

Does evolutionary theory need a rethink? K. Laland et al. en *Nature*, vol. 514, págs. 161-164, octubre de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Pero, ¿existe la herencia lamarckiana? Otto E. Landman en *IyC*, julio de 1993.

Orígenes de la complejidad biológica. Carl Zimmer en *IyC*, febrero de 2014.

Nuevo mecanismo de creación de especies. Gregory D. D. Hurst y Chris D. Jiggins en *IyC*, marzo de 2014.

Un nuevo tipo de herencia. Michael K. Skinner en *IyC*, octubre de 2014.

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Ejemplares atrasados de *Investigación y Ciencia*: 6,90€



PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorra un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO*
o 5 ejemplares de *TEMAS*
por el precio de 4 = 27,60€

SELECCIONES TEMAS

Ahorra más del 25 %

Ponemos a tu disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materias.

3 ejemplares = 15,00 €

1. ASTRONOMÍA
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. BIOLOGÍA
Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. COMPUTACIÓN
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. FÍSICA
Núcleos atómicos y radiactividad, Fenómenos cuánticos, Fronteras de la física
5. CIENCIAS DE LA TIERRA
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. GRANDES CIENTÍFICOS
Einstein, Newton, Darwin
7. MEDICINA
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. MEDIOAMBIENTE
Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. NEUROCIENCIAS
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
11. LUZ Y TÉCNICA
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser
12. ENERGÍA
Energía y sostenibilidad, El futuro de la energía (I), El futuro de la energía (II)

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN (BSA)

Ahorra más del 60 %

Los 7 títulos indicados de esta colección por 75 €

- Tamaño y vida
- Partículas subatómicas
- Construcción del universo
- La diversidad humana
- El sistema solar
- Matemáticas y formas óptimas
- La célula viva (2 tomos)

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN

DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*
ANUAL (2 tomos) = 12,00 €
más gastos de envío = 5,00 €



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €



GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

	España	Otros países
1er ejemplar	2,00 €	4,00 €
Por cada ejemplar adicional	1,00 €	2,00 €

Para efectuar tu pedido:

Teléfono: (34) 934 143 344

A través de nuestra Web:

www.investigacionyciencia.es

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,90 €

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones *
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito *
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria *
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación
MyC 53: Neuropsicología urbana
MyC 54: Naturaleza y psique
MyC 55: Neuropsicología del yo
MyC 56: Psiquiatría personalizada
MyC 57: Psicobiología de la obesidad
MyC 58: El poder del bebé
MyC 59: Las huellas del estrés
MyC 60: Evolución del pensamiento
MyC 61: TDAH
MyC 62: El legado de Freud
MyC 63: ¿Qué determina la inteligencia?
MyC 64: Superstición
MyC 65: Competición por el cerebro
MyC 66: Estudiar mejor
MyC 67: Hombre y mujer
MyC 68: La hipnosis clínica
MyC 69: Cartografía cerebral
MyC 70: Pensamiento creativo
MyC 71: El cerebro bilingüe
MyC 72: Musicoterapia
MyC 73: La neurociencia del futuro
MyC 74: El poder de las marcas
MyC 75: Evaluar la personalidad
MyC 76: Estimulación cerebral

(*) Disponible solo en formato digital





TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,90 €

T-1: Grandes matemáticos *
T-2: El mundo de los insectos *
T-3: Construcción de un ser vivo *
T-4: Máquinas de cómputo
T-5: El lenguaje humano *
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-10: Misterios de la física cuántica *
T-11: Biología del envejecimiento *
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-19: Los orígenes de la humanidad *
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales *
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-28: La consciencia *
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-51: El tiempo *
T-52: El origen de la vida *
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen? *
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico *
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura
T-67: Energía y sostenibilidad
T-68: La ciencia después de Alan Turing
T-69: La ciencia de la longevidad
T-70: Orígenes de la mente humana
T-71: Retos de la agricultura
T-72: Origen y evolución del universo
T-73: El sida
T-74: Taller y laboratorio
T-75: El futuro de la energía (I)
T-76: El futuro de la energía (II)
T-77: El universo matemágico de Martin Gardner
T-78: Inteligencia animal
T-79: Comprender el cáncer
T-80: Grandes ideas de la física
T-81: Epigenética
T-82: La ciencia ante el cambio climático

(*) Disponible solo en formato digital





Precio por ejemplar: 6,90 €

Cuadernos 1: El cerebro
Cuadernos 2: Emociones
Cuadernos 3: Ilusiones
Cuadernos 4: Las neuronas
Cuadernos 5: Personalidad, desarrollo y conducta social
Cuadernos 6: El mundo de los sentidos
Cuadernos 7: El sueño
Cuadernos 8: Neuroglía
Cuadernos 9: La memoria
Cuadernos 10: Adicciones
Cuadernos 11: Lenguaje y comunicación
Cuadernos 12: El dolor



por Xavier Rodó

Xavier Rodó es profesor ICREA en el Instituto Catalán de Ciencias del Clima.



Menos emisiones, menos epidemias

Los beneficios en salud de reducir las emisiones de gases de invernadero y mitigar el cambio climático superarán en mucho los costes

El cambio climático centra las agendas políticas más que de costumbre en los últimos tiempos y no solo por la cumbre celebrada el mes pasado en París. Una destacada sucesión en las temperaturas medias del planeta de seis máximos anuales en los últimos diez años (2005, 2009, 2010, 2013, 2014 y 2015, el más cálido de todos los registrados hasta la fecha) ha ayudado a concienciarnos de que habitamos un planeta que se está calentando a un ritmo acelerado y que, por desgracia, está sufriendo uno de los peores escenarios de emisiones de gases de invernadero.

Si bien es cierto que los debates en torno a las consecuencias del calentamiento global suelen estar dominados por las incertidumbres (debidas a la complejidad de los procesos implicados, la falta de datos y a la inevitable transmisión de errores, que se amplifican desde las proyecciones climáticas hasta las de los impactos), tendremos que aprender a vivir y actuar con estas, pues las consecuencias de la inacción son mucho más graves para nuestro esquilmado planeta, y también para nuestra salud.

El peor efecto sobre la salud humana va a producirse a través del empeoramiento de la ya mala calidad del aire que respiramos en las ciudades. En particular, debido al incremento del tráfico y de los gases derivados, del ozono y de las partículas respirables de menos de 2 micras provenientes mayoritariamente de la combustión de vehículos diésel. Se prevé un aumento de alergias, rinitis, trastornos cardiorrespiratorios y reacciones inmunitarias aún poco descritas.

Alrededor de las ciudades contaminadas van a crecer nuevos megasuburbios, sobre todo en países de renta per cápita baja o media y de latitudes tropicales, que son aquellos históricamente con menor capacidad de adaptarse a esos cambios rápidos y derivados de la masificación de personas y vehículos, a la vez que claramente menos responsables de la situación climática actual. Algunas previsiones indican que en estas áreas se va a concentrar hasta un 70 por ciento de la población mundial en el año 2030.

Esa superpoblación llevará consigo un aumento de la mortalidad debido al llamado «efecto de isla de calor urbana», es decir, el calentamiento adicional producido por la pavimentación de las calles, los bloques de pisos y las grandes estructuras de cemento (en Barcelona, este fenómeno es responsable de diferencias de más de 5 °C de temperatura respecto a la media de zonas adyacentes). Asimismo, los cambios en la circulación atmosférica traerán a nuestras latitudes situaciones de mayor estancamiento de las masas de aire sobre las ciudades, lo que tendrá un impacto negativo en la salud, sobre todo en aquellos sectores de la población más vulnerables (ancianos, niños, asmáticos o personas con enfermedades cardiorrespiratorias crónicas).



ISTOCKPHOTO/CREATIVAIMAGES

En cuanto a las enfermedades infecciosas, son preocupantes los cambios que se están produciendo en los límites de su distribución geográfica. En el caso de la malaria, un estudio llevado a cabo por Mercedes Pascual, de la Universidad de Michigan, y sus colaboradores, y publicado en *Science* en marzo de 2014, concluye que, en los años más cálidos, la enfermedad llega a cotas más altas en Colombia y Etiopía; el calentamiento global amenaza, pues, la salud de las zonas montañosas densamente pobladas de África y América del Sur. Otro trabajo desarrollado en Senegal por nuestro grupo y otros colaboradores internacionales, y publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences* en julio de 2015, comprobó que en esas zonas semidesérticas la propagación de la enfermedad viene controlada por los cambios en el patrón de lluvias. En ambos casos (zonas montañosas y zonas semidesérticas), la exposición previa a la enfermedad y la memoria inmunitaria de la población desempeñan un papel determinante tanto en la amplificación como en la expansión de esta a nuevas áreas geográficas.

Ante este panorama, y a juicio de quien escribe, el tan aireado —parece que por deseado— límite en el incremento de las emisiones que determine un aumento global medio de temperatura de «solo» 2 °C nos trae un mundo ya de por sí potencialmente peligroso, debido a nuestro desconocimiento sobre cuáles pueden ser la naturaleza y la distribución de los impactos de dicho calentamiento global.

Los beneficios de una acción decidida en defensa de un planeta más amable con el clima son claros y palpables, también, y sobre todo, en el ámbito de la salud humana. El binomio clima-salud debería aparecer indisociablemente ligado en todos los acuerdos de reducción de emisiones si queremos proveer a las generaciones futuras de un planeta habitable.

por Pere Castells



Pere Castells, experto en ciencia y cocina, es coordinador del proyecto UB-Bullifoundation.

Maridaje de alimentos: ¿arte o ciencia?

Luces y sombras de la teoría del *food pairing*

Con el nacimiento de la ciencia moderna en el siglo XVIII, surgieron numerosas teorías que permitieron dar sentido a la interpretación de las observaciones experimentales. Algunas, además, entrañaron importantes progresos. Pensemos en la teoría atómica que John Dalton publicó en 1808; aunque su reconocimiento no resultó fácil ni inmediato (no fue hasta principios del siglo XX cuando la comunidad científica la aceptó), representó un gran avance para la ciencia.

Más allá de las controversias, las teorías consolidan las disciplinas. De la idea inicial de Dalton a la visión actual, la teoría atómica ha cambiado radicalmente; pero lo importante es que ha cosechado numerosos avances científicos y técnicos. Un fenómeno parecido está sucediendo hoy en el campo de la gastronomía molecular.

Una de las teorías gastronómicas más extendidas y, a su vez, controvertida, es la del maridaje de alimentos (*food pairing*). Según esta, los alimentos que comparten compuestos saporíferos tienden a saber mejor cuando se combinan entre ellos.

En 1992, el cocinero de The Fat Duck, Heston Blumenthal, descubrió, por pura experimentación, que el chocolate blanco combinaba de forma excelente con el caviar. Se propuso descubrir el porqué con la ayuda de François Benzi, de la empresa de aromas Firmenich. De esa investigación nacía la hipótesis del *food pairing*, que planteaba la identificación de combinaciones sabrosas.

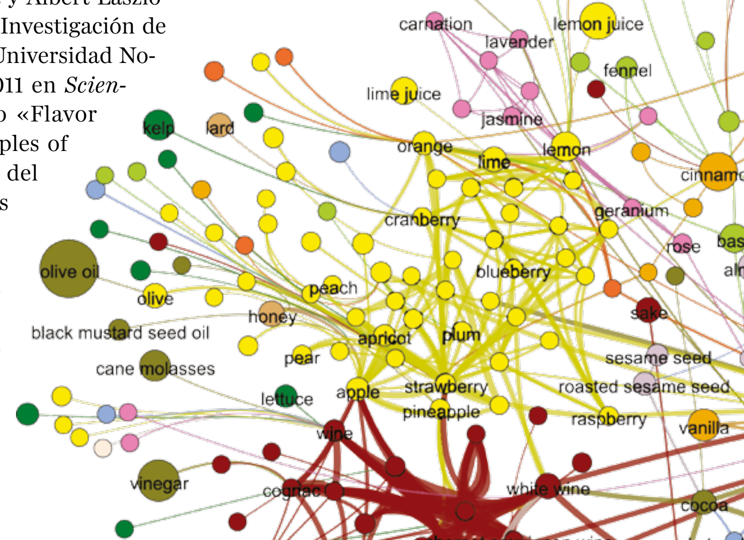
La teoría se fue difundiendo. En 2007, Bernard Lahousse, después de experimentar con chefs de prestigio como Sang Hoon Degeimbre (del restaurante L'Air du Temps, en Bélgica), y Sergio Herman (del Oud Sluis, en los Países Bajos), presentó en el congreso celebrado en San Sebastián «Lo mejor de la gastronomía» la página web www.foodpairing.com (todavía activa), como una herramienta culinaria para obtener nuevas combinaciones de alimentos.

Desde Quebec, François Chartier (mejor sumiller del mundo en 1994) aplica este enfoque molecular a las combinaciones entre vinos y elaboraciones. Propone unir comidas y vinos a partir de lo que ha denominado «ingredientes puente armónicos». Chartier ha experimentado con sabores como el del anís, que proviene de compuestos como el anetol y el estragol (presentes en el hinojo, el laurel, el estragón y la albahaca), y los ha combinado con vinos elaborados a partir de variedades de uva con estos mismos componentes (albariño, godello, pinot blanc). Remarca la necesidad de vincular al vino no solo los conceptos clásicos de cuerpo, ácido y sensación en la boca, sino también los compuestos aromáticos más representativos.

Pero la nueva teoría tiene también sus detractores. El 29 de octubre de 2009, Hervé This publicó en su blog un artículo titulado «El *food pairing*, una teoría falsa... que no es científica, por mil razones». En su opinión, la propuesta contradice la experiencia (existen numerosas combinaciones deliciosas que, según esta teoría, no deberían serlo tanto). Además, no es científica porque no es refutable (casi siempre podremos encontrar trazas de algún compuesto concordante, puesto que los alimentos contienen gran cantidad de moléculas saporíferas). Finalmente, comenta que los pocos amigos suyos que apoyaban esta teoría admitieron que para ellos era solo una fuente de inspiración artística.

Con el propósito de evaluar la hipótesis molecular del maridaje de alimentos, un equipo interdisciplinario dirigido por Sebastian E. Ahnert y Albert-László Barabási, del Centro de Investigación de Redes Complejas de la Universidad Nororiental, publicó en 2011 en *Scientific Reports* el artículo «Flavor network and the principles of food pairing». A partir del análisis de macrodatos sobre las numerosísimas moléculas responsables de las propiedades olfativas, gustativas y táctiles de los alimentos, los investigadores crearon un mapa de sabores, un entramado gigante de ingredientes unidos por sus compuestos saporíferos compartidos [*véase una infografía sobre este trabajo en* «Sensaciones comunes», por Michael Moyer; Investigación y Ciencia, noviembre de 2013]. Después de estudiar los patrones de combinación de ingredientes en 56.498 elaboraciones, concluyeron que la hipótesis del *food pairing* se confirma en las recetas estadounidenses pero no en las del este de Asia, donde se tiende a evitar la combinación de ingredientes con saporíferos comunes. Los autores ven estas diferencias como una oportunidad para seguir explotando el potencial que ofrece el análisis de los macrodatos gastronómicos (cada vez más abundantes y accesibles) para ahondar en la comprensión sistemática de la práctica culinaria.

Las nuevas investigaciones en macrodatos y cocina han dado lugar al nacimiento de la «gastronomía computacional», nueva especialidad en la que Marta Vila, de la Universidad de Barcelona, se erige como especialista. Además, la nueva generación de ordenadores permitirá combinar el conocimiento actual de las redes de sabor con el aprendizaje informático (en IBM están desarrollando programas, como Chef Watson, para aprender a elaborar combinaciones de alimentos deseables). En suma, un nuevo camino para el avance de la gastronomía y la alimentación.



FUENTE: «FLAVOR NETWORK AND THE PRINCIPLES OF FOOD PAIRING», POR YONG-YEOL AHN, SEBASTIAN E. AHNERT, JAMES P. BAGROW Y ALBERT-LÁSZLÓ BARABÁSI EN *SCIENTIFIC REPORTS*, VOL. 1, ART. N.º 196, 15 DE DICIEMBRE DE 2011.

BOTÁNICA

LA FLORA DE LOS LADOS DE ÁFRICA

Varias especies vegetales emparentadas entre sí habitan lados opuestos del continente africano, aisladas unas de otras. El origen de esta distribución peculiar, denominada *Rand Flora*, intriga desde hace tiempo a los botánicos

Isabel Sanmartín, Lisa Pokorny y Mario Mairal



MÁRGENES



EL ARCHIPIÉLAGO DE SOCOTRA (Yemen) constituye una de las zonas donde se hallan plantas de la *Rand Flora*. En la isla crece una especie de drago (*Dracanea cinnabari*) emparentada con el legendario drago canario (*D. drago*), en el lado opuesto del continente.

Isabel Sanmartín, investigadora titular del Real Jardín Botánico (RJB), del CSIC, en Madrid, es especialista en biogeografía evolutiva. Centra sus investigaciones en los patrones biogeográficos a gran escala y el desarrollo de métodos analíticos para reconstruir dichos patrones.

Lisa Pokorny, investigadora posdoctoral en el Real Jardín Botánico de Kew, está interesada en desentrañar patrones macroevolutivos, con énfasis en las plantas.

Mario Mairal, investigador en el RJB, estudia procesos de macroevolución y microevolución en sistemas insulares, con especial énfasis en la distribución *Rand Flora* y el género *Canarina*.



Cuando nos fijamos en la distribución de las especies sobre la Tierra, varias preguntas acuden a nuestra mente: ¿Por qué algunas regiones del planeta albergan un mayor número de especies que otras? ¿Cuándo, dónde y cómo se formó la diversidad biológica de un continente? La presente crisis de la biodiversidad (se estima que alrededor de una décima parte de las especies del planeta desaparecerá en los próximos 100 años) y la acuciante necesidad de profundizar en las vías para su conservación han hecho crecer el interés por entender los mecanismos evolutivos que determinan la actual distribución geográfica de los animales y de las plantas.

Un tipo de distribución que ha llamado especialmente la atención de botánicos y zoólogos desde los tiempos de Charles Darwin, Joseph D. Hooker y Alfred R. Wallace es la disyunción geográfica. En ella, varios organismos estrechamente emparentados habitan diferentes localidades entre las que no existe una continuidad geográfica. Un ejemplo lo ofrece la disyunción «gondwánica» de los mamíferos marsupiales, cuyos representantes viven en continentes del hemisferio sur actualmente aislados por cuencas oceánicas: los opósums en América, por un lado, y los uombats y los canguros en Australia y Nueva Guinea, por otro. Otro ejemplo corresponde a la disyunción «anfi-atlántica» que se observa en numerosas plantas leñosas del hemisferio norte, como los nogales o las magnolias: mientras que algunas de las especies medran en los Apalaches norteamericanos, sus parientes más próximos lo hacen en Japón y el este de China.

Frente al interés despertado por el origen de estas distribuciones transoceánicas, otro tipo de disyunción ha recibido menos atención. Se trata de las disyunciones intracontinentales, en las que las especies emparentadas ocupan regiones geográficas separadas y aisladas una de otra dentro de un mismo continente. Las barreras que dividen estas regiones no son geográficas, como en el caso de continentes distanciados por cuencas oceánicas, sino ambientales: las especies disyuntas están separadas por zonas intermedias de clima hostil, un lugar donde no podrían sobrevivir y que solo cruzan muy ocasionalmente. Es el caso de las regiones de montaña separadas por llanuras o fragmentos de selva aislados por sabanas.

Uno de los ejemplos más conocidos de este tipo de distribución es la *Rand Flora* africana (en alemán, *Rand* significa «margen»), que corresponde a la existencia de plantas emparentadas en márgenes opuestos del continente. El caso más destacado lo ofrecen los dragos canarios, del género *Dracaena*, un linaje todavía en estudio que supuestamente presenta sus parientes más cercanos en Arabia y el noreste de África. Pero existen numerosos géneros menos populares (*Canarina*, *Campylanthus*, *Camptoloma*) que atestiguan la existencia de este patrón.

¿Qué mecanismos evolutivos generaron esa distribución peculiar de la flora africana y cuándo tuvieron lugar? Gracias al empleo de nuevos métodos moleculares y técnicas de análisis biogeográfico, nuestro grupo ha determinado con mayor precisión el momento en que se diversificaron los linajes y se originaron las disyunciones. Tal conocimiento ha ayudado a responder la pregunta principal de si las divergencias entre

EN SÍNTESIS

Los botánicos se preguntan desde hace tiempo sobre una curiosa distribución de las plantas en África, la *Rand Flora*, en la que algunas especies parientes ocupan los márgenes del continente, separadas por barreras climáticas o geográficas.

Tradicionalmente se han planteado dos hipótesis para explicar esa distribución: la vicarianza, o aparición de una barrera que aísla dos zonas, y la dispersión con una posterior especiación en el lugar.

Los análisis moleculares, que han establecido las relaciones evolutivas entre las especies y el momento en que se produjo su separación, sugieren que la disyunción *Rand Flora* se formó por una combinación de vicarianza ecológica y de dispersión escalonada como respuesta a la aridificación del continente.

ISTOCKPHOTO/ZANSKAR (*páginas anteriores*)

los taxones coincidieron con los grandes eventos climáticos y geológicos de la historia de la Tierra.

Nuestros resultados sugieren que la disyunción *Rand Flora* no tiene un único origen temporal, sino que se habría formado por una combinación de dos mecanismos: el aislamiento geográfico por la aparición de una barrera climática (vicarianza ecológica) y la dispersión escalonada seguida de una especiación en refugios, coincidiendo con una aridificación del clima que se inició en el Mioceno, hace 16 millones de años, un proceso que todavía hoy perdura.

Tal hallazgo reviste interés porque nos ayuda a prever cuál será la respuesta de las especies ante el cambio climático actual, no solo en África, sino también en otras zonas secas y vulnerables a la desertificación, entre ellas la región mediterránea. Se trata de una información relevante que nos ofrece la oportunidad de idear estrategias de gestión para mitigar las consecuencias negativas del cambio climático en la biodiversidad vegetal.

UNA FLORA SINGULAR

El patrón fitogeográfico *Rand Flora* viene intrigando a los botánicos desde que fue descrito por el botánico suizo K. H. Heinrich Christ, en 1892. Las especies o linajes emparentados se distribuyen en los márgenes del continente africano formando un anillo, mientras que en el centro estas se hallan ausentes. Se distinguen cinco grandes zonas con especies representativas de la *Rand Flora*: Macaronesia (islas Azores, Salvajes, Madeira, Canarias y Cabo Verde) y noroeste de África; regiones montañosas de África occidental; sur de Arabia y Cuerno de África; este de África (incluida Madagascar), y Sudáfrica.

Muchos de esos linajes de plantas exhiben adaptaciones morfológicas (como suculencia, o acumulación de agua en los tejidos, y reducción de la superficie foliar) a climas subtropicales o semiáridos, por lo que la cuenca tropical del Congo en el centro de África, donde predomina la pluvisilva, o los grandes desiertos del norte, como el Sáhara o el desierto arábigo, representarían áreas de clima hostil más o menos infranqueables.

Uno de los ejemplos por antonomasia de este enigmático patrón florístico es el de *Canarina canariensis*, una especie de la familia de las campanillas de las islas Canarias que, según ha comprobado nuestro equipo en un estudio reciente, presenta su especie hermana (*Canarina eminii*) en los bosques de montaña del este de África, ambas separadas por los 5000 kilómetros del desierto del Sáhara. Otros ejemplos de esta disyunción afro-macaronésica pueden hallarse en el romero marino (*Campylanthus*) o el argán (*Sideroxylon*).

Además de estos ejemplos de disyunción entre Macaronesia y el este de África-Arabia, existen otras familias de plantas que exhiben disyunciones con el sur del continente, como *Camptoloma*, un pequeño género cuyas tres únicas especies viven, respectivamente, en las regiones de Macaronesia, Cuerno de África y suroeste de África.

LAS HIPÓTESIS DE PARTIDA

A escala mundial, se han propuesto dos mecanismos principales para explicar las distribuciones disyuntas de las especies: la vicarianza, o fragmentación de una zona ancestral debido a la aparición de una barrera geológica o climática; y la dispersión de los organismos de un área a otra aislada de esta, con una posterior especiación en la zona colonizada. Durante mucho tiempo, la vicarianza fue la hipótesis favorita entre biogeógrafos para interpretar las disyunciones, apoyada por el descubrimiento de la teoría de la tectónica de placas, que explicaría el origen de una cadena montañosa o la apertura de un océano entre dos continentes. En África, esos dos mecanismos han servido para plantear sendas hipótesis sobre el origen de la distribución *Rand Flora*.

Según la hipótesis de la vicarianza, las especies actuales son relictos (vestigios del pasado) de una antigua flora que se habría extendido por todo el continente y áreas adyacentes durante el Cenozoico (hace 65 millones de años) y que se extinguiría más tarde en el centro y el norte como consecuencia de una aridificación gradual (que aún afecta al sur del Mediterráneo). Este cambio climático sería el resultado, por un lado, de procesos tectónicos (levantamiento del este de África, colisión de la placa arábiga con la eurasiática) y, por otro, de la deriva del continente africano desde una posición más meridional, cercana al polo sur (cuando formaría parte del supercontinente Gondwana, hace 100 millones de años), hasta su localización actual, próxima al ecuador.

El hecho de que las áreas donde se localizan los linajes *Rand Flora* presenten en general un alto grado de diversidad se explicaría, entonces, por su función de refugios climáticos. En ellos, la estabilidad ambiental habría permitido la supervivencia y diversificación de linajes antiguos, que se dispersarían hacia áreas adyacentes en períodos en los que las condiciones climáticas resultaron favorables. Otro aspecto que secundaría la teoría de la vicarianza es la observación de disyunciones *Rand Flora* en familias de plantas muy distintas (como las campanillas, las leguminosas o las margaritas), con adaptaciones a diversos ambientes (zonas de montaña, semiáridas, laurisilva, etcétera). Ello apoyaría la idea de que un mecanismo común, como un cambio climático global, habría provocado una extinción a gran escala en ciertas regiones del continente.

Por otra parte, la hipótesis de la dispersión plantea que la distribución actual es el resultado de eventos de dispersión relativamente recientes entre regiones aisladas geográficamente. A diferencia de la vicarianza, no existe un mecanismo común, sino que cada linaje se dispersa de forma independiente y de acuerdo con sus adaptaciones ecológicas.

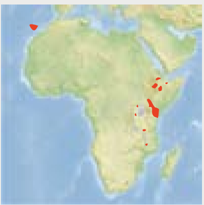
En la formación de disyunciones intercontinentales, numerosos estudios biogeográficos respaldan la idea de la dispersión a larga distancia como un proceso determinante. En el caso de la *Rand Flora*, ciertas zonas pudieron haber actuado como corredores intermedios y haber favorecido una dispersión escalonada, o en pasos sucesivos. Se ha esgrimido así que el levantamiento de la cadena montañosa del Drakensberg en Sudáfrica y de los arcos montañosos del este de África durante el Plioceno (hace 5 millones de años) habrían actuado como corredores que facilitarían la dispersión hacia el norte de linajes endémicos de la flora capense en Sudáfrica. Asimismo, algunos sistemas montañosos aislados actualmente en medio del Sáhara, como las montañas del Tibesti en el Chad o el macizo del Hoggar en Argelia, habrían funcionado como islas continentales con hábitats favorables y habrían permitido la dispersión entre el noreste y noroeste de África durante las etapas glaciares.

Esas migraciones habrían seguido dos rutas de dispersión principales. En la primera predominarían los desplazamientos de norte a sur, tanto desde la región mediterránea como desde Asia central hacia África. En este caso, la colisión de la placa arábiga con Eurasia a mediados del Mioceno, hace 16 millones de años, habría servido de puente para colonizar el este y sur de África. La segunda ruta seguiría la dirección del sur de África hacia el norte, aprovechando el levantamiento de las montañas y altiplanos del este de África hace 5 millones de años.

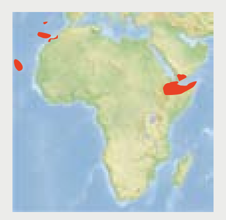
Plantas que se distribuyen en los márgenes de África

En la distribución *Rand Flora* se observa cómo algunas especies emparentadas de carácter subtropical ocupan los márgenes de África, aisladas por barreras como desiertos, pluvisilva o montañas. Mientras que algunos géneros incluyen especies distribuidas entre dos o tres zonas (disyunciones este-oeste o este-oeste-sur), otros muestran disyunciones amplias, con numerosos representantes en áreas más extensas.

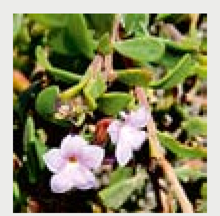
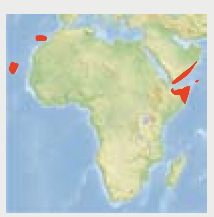
Disyunciones este-oeste

***Canarina* (Campanulaceae)**
Posee 3 especies: *C. canariensis* (*imagen*), en Canarias, y *C. eminii* y *C. abyssinica*, en el este. Habitan en fragmentos de bosque subtropical considerados vestigios de una flora antigua.

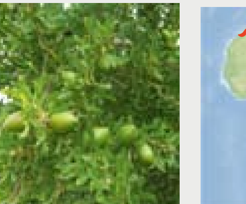
***Aeonium* (Crassulaceae)**
La mayoría de las 40 especies de bejeques son endémicas de Macaronesia (34 en Canarias). Tan solo 2 aparecen en el Cuerno de África y el sur de Arabia. En la imagen, *A. manriqueorum*.

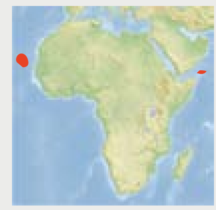
***Campylanthus* (Plantaginaceae)**
Es el caso opuesto a *Aeonium*. De sus 18 especies, 2 viven en Macaronesia y 16 se distribuyen desde el Cuerno de África hasta Pakistán. En la imagen, *C. glaber*.




***Kleinia* (Asteraceae)**
Con 50 especies, los verodes, muestran una disyunción entre *K. anteuphorbium,* presente en Marruecos-noreste de África, y *K. neriifolia* (*imagen*), en Canarias.




***Sideroxylon* (Sapotaceae)**
S. mascatense, del este de África y la península arábiga, tiene como especie hermana el argán (*S. spinosum, imagen*), del noroeste de Marruecos.

***Campanula* (Campanulaceae)**
Las campanillas presentan una disyunción entre *C. jacobea* (*imagen*), endémica de Cabo Verde, y *C. balfourii*, endémica de Socotra (Yemen).

La colonización de las nuevas regiones donde no existían competidores próximos habría favorecido una rápida diversificación y especiación in situ, lo que explicaría la riqueza florística de muchas de estas regiones. Por supuesto, la dispersión y la vicarianza no son procesos incompatibles, y la visión actual es que ambos habrían actuado en la formación de disyunciones biogeográficas.

APLICACIÓN DE NUEVOS MÉTODOS

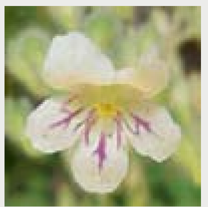
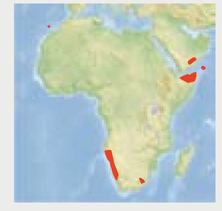
Hasta hace muy poco los estudios biogeográficos sobre la *Rand Flora* se habían limitado a la comparación de patrones de distribución entre distintos linajes en busca de hipótesis que pudiesen aclarar su origen pero sin una evaluación rigurosa de estas. Durante la última década, tres grandes avances han hecho posible evaluar las dos hipótesis planteadas arriba.

El primero ha sido la aplicación de análisis moleculares para determinar el momento en que se originó una especie o grupo de especies. En concreto, se ha comparado el ADN de distintas especies para reconstruir las relaciones evolutivas entre ellas y datar las disyunciones geográficas. La estrategia empleada se conoce como reloj molecular y se basa en el hecho de que las mutaciones no selectivas se acumulan de forma constante en el ADN a lo largo del tiempo [*véase* «La evolución en la vida cotidiana», por David P. Mindell; en Investigación y Ciencia, enero de 2009].

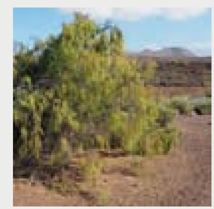
Muchas de las relaciones evolutivas esgrimidas para apoyar el patrón *Rand Flora* se basaban tradicionalmente en la identificación de similitudes morfológicas entre linajes. No obstante, los métodos moleculares han hecho posible una reconstrucción filogenética más precisa y han demostrado que en ciertos casos estas semejanzas eran el resultado de una convergencia evolutiva (como consecuencia de una misma adaptación morfológica a ambientes similares). Por otro lado, el reloj molecular, calibrado con el registro fósil, o bien con estimaciones de la tasa de evolución molecular en linajes emparentados, ha permitido distinguir entre eventos antiguos de vicarianza geológica o climática y los eventos de dispersión reciente.

Un segundo avance importante se ha derivado de la reciente acumulación de datos paleontológicos, paleogeográficos y paleoclimáticos, que han hecho posible la reconstrucción detallada del efecto de cambios climáticos pasados en la vegetación de África. Estas reconstrucciones indican que la aridificación

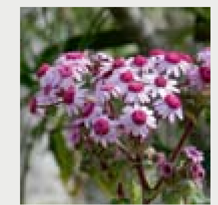
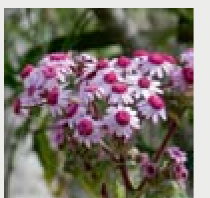
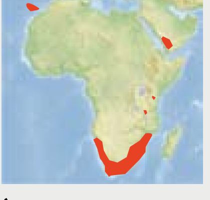
Disyunciones este-oeste-sur

Camptoloma (Scrophulariaceae)
El género, con 3 especies, tiene una distribución restringida a tres zonas. *C. canariensis* (*imagen*) en Gran Canaria, *C. lyperiiflorum* en el Cuerno de África, y *C. rotundifolia* en Angola y Namibia.

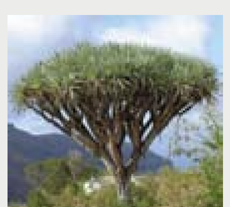
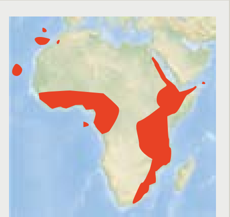


Plocama (Rubiaceae)
A este género (34 especies) pertenece el balo canario (*P. pendula, imagen*), que está emparentado con *P. yemenensis* y *P. tinctoria* en el este de África y Socotra, y *P. crocyllis,* en el sur.

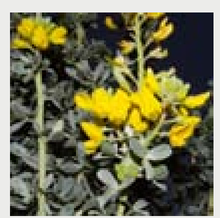
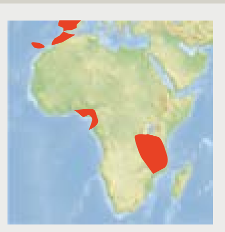




Pericallis (Asteraceae)
Las flores de mayo, con 14 especies endémicas de Macaronesia, son hermanas de *Emilia discifolia* y otras especies del género *Senecio* presentes en el este y el sur. En la imagen, *P. hadrosoma*.

Disyunciones de amplia distribución

Dracaena (Asparagaceae)
Los dragos (200 especies) son un ejemplo emblemático de la distribución. Se hallan en áreas tan distantes como Canarias (*D. draco, imagen*), Etiopía (*D. ellenbeckiana*) o Socotra (*D. cinnabari*).

Adenocarpus (Fabaceae)
Entre los codesos (26 especies), *A. manii*, de regiones subtropicales de África, es hermana de un grupo de especies mediterráneas y macaronésicas (como *A. anagyrifolius, imagen*).

Euphorbia (Euphorbiaceae)
Las lechetreznas, que cuentan con 2000 especies, muestran en África varias disyunciones entre el este y el oeste, como la de la sección *Aphyllis* (en la imagen, *E. aphylla*).

J. SÁNCHEZ PORTERO/WIKIMEDIA COMMONS/CC BY SA 3.0 (P. pendula); F. VINCENTZ/CC BY SA 3.0 (E. balsamifera); WIKIMEDIA COMMONS/CC BY SA 3.0 (E. aphylla)

del continente africano a partir del Mioceno no fue continua, sino que se produjo en etapas distintas que coincidieron con importantes procesos tectónicos y climáticos. La aridificación avanzó desde el sudoeste hacia el nordeste, de forma que se da la paradoja de que la región central del Congo era a comienzos del Mioceno un desierto, mientras que el norte de África mantenía condiciones semitropicales. El levantamiento del este del continente, la colisión de Arabia con Eurasia y el cierre del mar de Tethys, hace 15 millones de años, contribuyeron al reemplazamiento gradual de una vegetación subtropical por otra formada por sabanas y praderas. El proceso de aridificación se completó con la formación del gran desierto del Sáhara hace 7 millones de años. Durante el Pleistoceno (últimos 3 millones de años), se sucedieron etapas de aridez (glaciares) con otras de clima más húmedo (interglaciares).

Finalmente, en la última década se han desarrollado nuevos métodos de análisis para la reconstrucción biogeográfica basados en modelos probabilísticos, cuya ventaja radica en que permiten la incorporación de información temporal. Ello es especialmente importante para describir el origen del patrón *Rand Flora* en el norte de África, porque la alternancia de períodos húmedos y áridos en el desierto del Sáhara probablemente ha dado lugar a una misma disyunción biogeográfica este-oeste en épocas geológicas distintas. Por consiguiente, la identificación de dos disyunciones muy similares entre esas dos regiones no tiene por qué corresponderse con un mismo evento de vicarianza climática.

ORIGEN EVOLUTIVO DE LA *RAND FLORA*

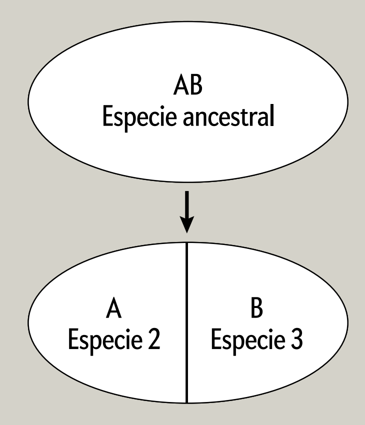
Uno de los primeros estudios que se sirvió de esos avances fue llevado a cabo por nuestro grupo en 2010. A partir de los datos filogenéticos y biogeográficos de 13 linajes de plantas que presentan la distribución *Rand Flora*, realizamos un metanálisis para examinar las distintas hipótesis del origen evolutivo de este patrón. Los datos filogenéticos, derivados de los análisis moleculares, los obtuvimos de la bibliografía o de anteriores trabajos realizados por nosotros mismos; los biogeográficos, a partir de bases de datos existentes, como la Infraestructura Mundial de Información en Biodiversidad, o monografías e inventarios locales.

Para verificar las hipótesis en cuestión, consideramos las diferentes regiones *Rand Flora* como «islas continentales» se-

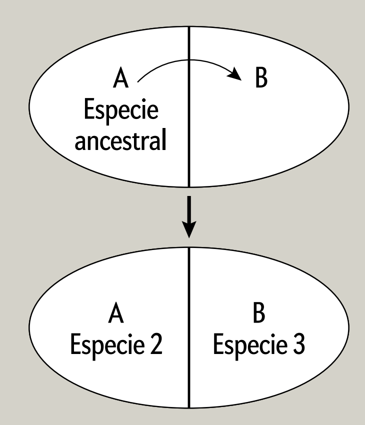
¿Cómo se originaron las disyunciones?

Para explicar las disyunciones biogeográficas (la existencia de especies estrechamente emparentadas en lugares alejados entre sí) se han propuesto tradicionalmente dos hipótesis: la vicarianza y la dispersión. En ambos procesos se forma una barrera geográfica que aísla las dos especies. En la dispersión, dicha barrera es más antigua que el origen de la disyunción; en la vicarianza, en cambio, la aparición de la barrera es responsable de esta.

VICARIANZA
El antepasado del grupo ocupaba un área ancestral (AB) que entonces abarcaba toda su distribución actual y que se dividió por la aparición de una o varias barreras (cadena montañosa, océano, desierto, etcétera).



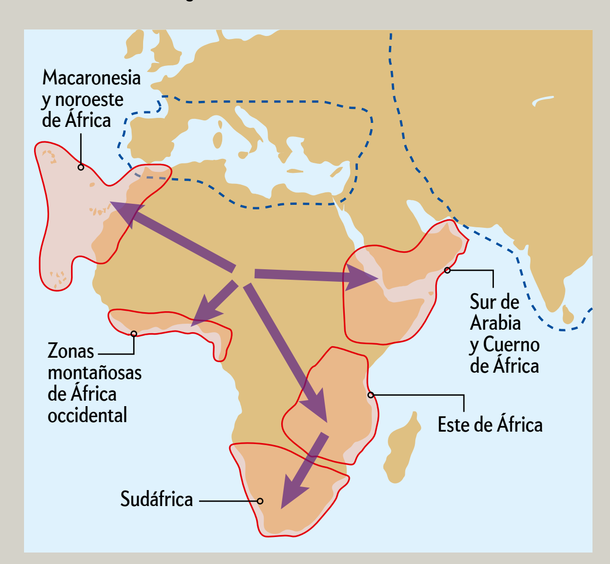
DISPERSIÓN
El antepasado del grupo se originó en un área ancestral o centro de origen (A), desde donde se dispersó a otras áreas (B) cruzando una o más barreras geográficas, y experimentó una posterior especiación en el área colonizada.



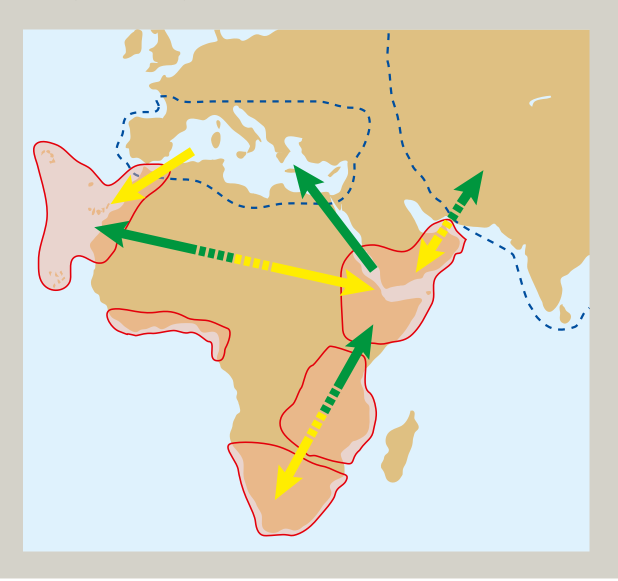
El caso africano

La distribución *Rand Flora* corresponde a la presencia de especies emparentadas en cinco grandes zonas (*áreas rojas*), algunas relacionadas con dos áreas adyacentes, la región mediterránea y Asia central (*áreas marcadas con líneas azules discontinuas*). Su origen se ha explicado según las dos teorías de arriba:

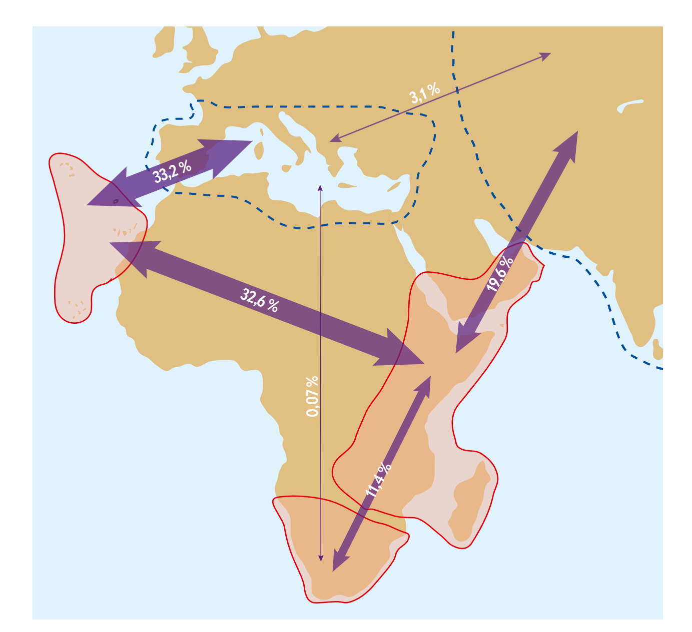
VICARIANZA
Una flora ancestral que ocuparía toda África sufriría los efectos de la aridificación del clima: tras desaparecer de la mayor parte del continente, se refugiaría en distintas zonas favorables en el margen del continente.



DISPERSIÓN
Se produciría por la propagación de las especies entre regiones aisladas, sea mediante migraciones predominantemente de norte a sur (*flechas amarillas*), o bien de sur a norte (*flechas verdes*).



MODIFICADO A PARTIR DE: «BAYESIAN ISLAND BIOGEOGRAPHY IN A CONTINENTAL SETTING: THE RAND FLORA CASE. I. SANMARTÍN ET AL., EN *BIOLOGY LETTERS*, VOL. 6, N.º 5, PÁGS. 703-707, 2010. (*mapas*)



MIGRACIONES ENTRE ZONAS. Mediante un metanálisis de 13 linajes de plantas con distribución *Rand Flora*, se calculó la tasa de intercambio biótico o dispersión histórica entre regiones a lo largo del tiempo (*expresada en porcentaje, proporcional al grosor de la flecha*). La tasa más alta se encontró entre Macaronesia-noroeste de África y este de África, lo que indicaba una conexión biótica más reciente, mientras que la más baja correspondió al sur del continente, con poco intercambio biótico con otras zonas, excepto con el este de África. También se vio la importancia de las migraciones que se produjeron con dos regiones adyacentes a África, el Mediterráneo y el centro de Asia.

MODIFICADO A PARTIR DE: «BAYESIAN ISLAND BIOGEOGRAPHY IN A CONTINENTAL SETTING: THE RAND FLORA CASE. I. SANMARTÍN ET AL., EN *BIOLOGY LETTERS*, VOL. 6, N.º 5, PÁGS. 703-707, 2010.

paradas por barreras climáticas, y adaptamos un método biogeográfico desarrollado para las islas oceánicas por uno de nosotros (Sanmartín) y otros colaboradores, con el fin de estimar la tasa de dispersión o intercambio biótico entre estas regiones a lo largo del tiempo. En el análisis se incluyeron, además, dos regiones adyacentes, el Mediterráneo y Asia occidental. El interés del método reside en la posibilidad de incorporar las diferencias entre los linajes *Rand Flora* para calcular su tasa de dispersión histórica entre las regiones. Tales diferencias incluyen la edad de origen del linaje (que varía entre millones y cientos de miles de años), la tasa de evolución molecular (esto es, la velocidad con la que su ADN experimenta cambios) o la capacidad dispersiva (por ejemplo, algunas especies poseen adaptaciones que favorecen su propagación, como la dispersión por viento, mientras que otras no).

Los resultados demostraron que la tasa de dispersión más alta se daba entre Macaronesia-noroeste de África y el este del continente, mientras que la más baja se observaba entre el sur y el resto de las regiones, con excepción de la región oriental, con la que sí se había detectado cierto intercambio biótico.

Esos hallazgos resultan relevantes puesto que concuerdan con las reconstrucciones paleogeográficas. El sur de África habría sido la primera zona en quedar aislada al avanzar el proceso de desertificación desde el sudoeste hacia el nordeste. En cambio, el norte mantuvo condiciones subtropicales hasta épocas más recientes (finales del Mioceno), lo que se evidencia en una tasa más elevada de intercambio biótico entre el este y oeste de esta región. Por otro lado, el hecho de que la principal dispersión desde el sur de África se dé con el este concuerda con la hipótesis de que los arcos montañosos de esta región fueron utilizados como un corredor por los linajes sudafricanos para migrar al norte. Estas hipótesis fueron corroboradas en un estudio reciente en el que datamos la disyunción *Rand Flora* en 16 linajes.

En definitiva, aunque es necesario reunir más pruebas, nuestros estudios nos llevan a concluir que lo que se conoce actualmente como el patrón *Rand Flora* se originó a partir de una serie de linajes que en el pasado tenían una distribución más amplia en el continente, los cuales experimentaron eventos de vicarianza ecológica y extinción asociados a una aridificación gradual en el Mioceno y el Plioceno, así como eventos de migración (dispersión) escalonada a través de corredores climáticos en distintos períodos geológicos.

OPORTUNIDAD ÚNICA

Frente al interés despertado por las regiones «hiperdiversas» como los neotrópicos, África ha sido hasta hace muy poco el continente olvidado, según lo demuestran los escasos estudios existentes sobre la evolución de su flora y fauna. Las investigaciones sobre el patrón *Rand Flora* suponen una importante contribución, ya que permitirán generar filogenias de numerosos grupos de plantas de todo el mundo con su centro de distribución en África.

Por otro lado, este patrón representa una oportunidad única para estudiar el papel de la extinción asociada a cambios climáticos en la evolución de la biodiversidad de un continente. Entender cómo reaccionaron las especies a los cambios climáticos del pasado puede ayudarnos a predecir las consecuencias del que está ocurriendo en la actualidad o de otros que puedan suceder en el futuro. Conocer en profundidad cómo reaccionó la flora africana ante las variaciones climáticas nos permitirá entender cuál será el efecto de la creciente aridificación del norte de África y el sur de Europa sobre la flora endémica mediterránea.

PARA SABER MÁS

Exposé sur le rôle que joue dans le domaine de nos flores la flore dite ancienne africaine. H. Christ en *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, n.º 3, págs. 369-374, 1892.

Inferring dispersal: a Bayesian approach to phylogeny-based island biogeography, with special reference to the Canary Islands. I. Sanmartín, P. Van Der Mark y F. Ronquist en *Journal of Biogeography*, vol. 35, págs. 428-449, 2008.

Living on the edge: timing of Rand Flora disjunctions congruent with ongoing aridification in Africa. L. Pokorny et al. en *Frontiers in Genetics*, vol. 6, art. 154, 2015.

Ancient vicariance and climate-driven extinction continental-wide disjunctions in Africa: the case of the Rand Flora genus *Canarina* (Campanulaceae). M. Mairal et al. en *Molecular Ecology*, vol. 24, págs. 1335-1354, 2015.

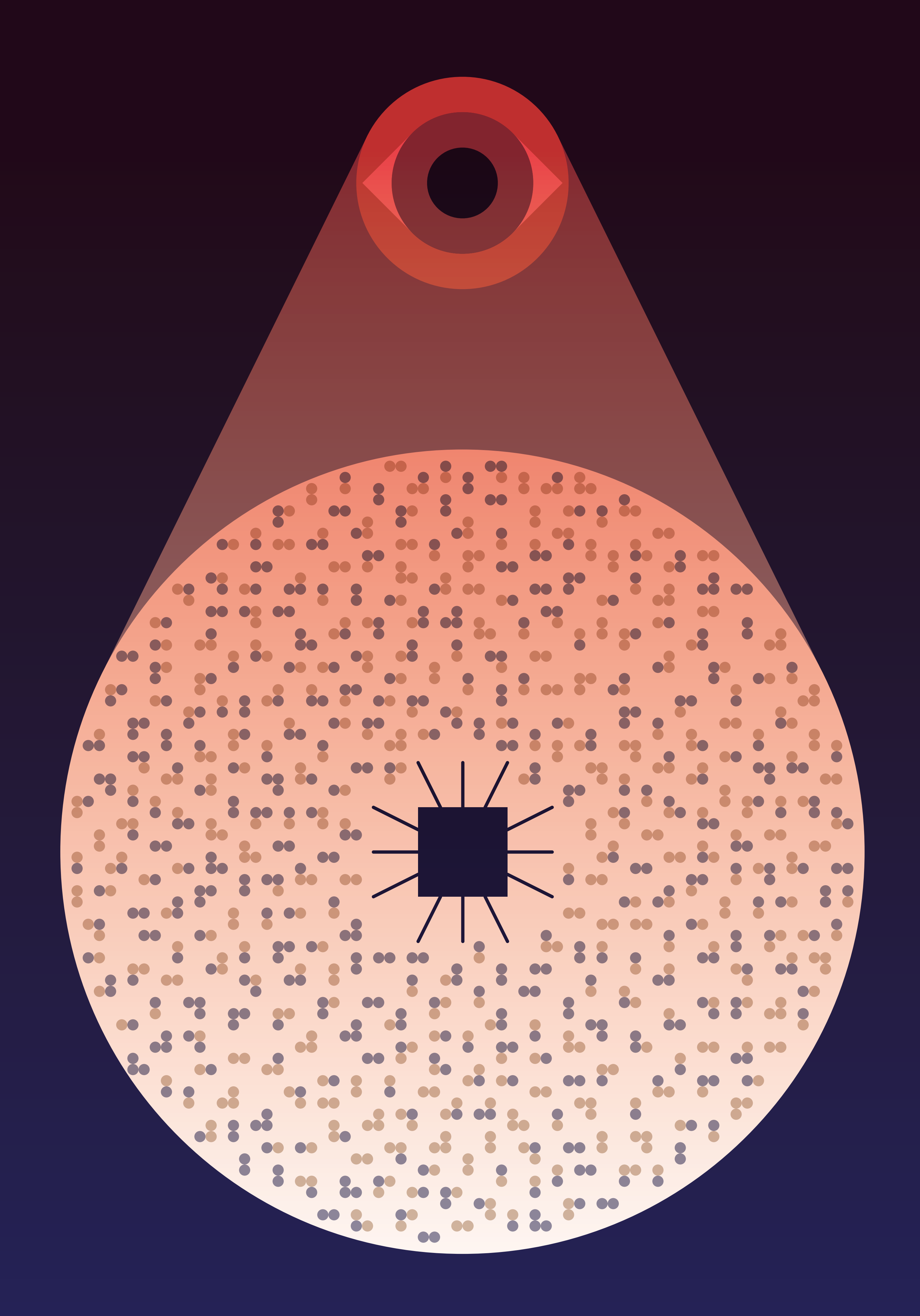
EN NUESTRO ARCHIVO

Cambio climático y distribución geográfica de las especies. E. Martínez Meyer y Claudia Ballesteros en *IyC*, junio de 2004.

Conservación de la biodiversidad. Stuart L. Pimm y Clinton Jenkins en *IyC*, noviembre de 2005.

El viento y la dispersión de las plantas. Angel M. Felicísimo y Jesús Muñoz en *IyC*, julio de 2010.

¿Qué mecanismos regulan la distribución de la biodiversidad? Andrés Baselga en *IyC*, julio de 2014.



MEDICINA

NANODISPOSITIVOS PARA DETECTAR INFECCIONES

Nuevos sensores minúsculos pueden diagnosticar enfermedades en tan solo veinte minutos, en lugar de días, lo que puede salvar muchas vidas

Shana O. Kelley

¿Por qué resulta tan difícil diagnosticar con rapidez una enfermedad infecciosa? Aunque podemos medir de forma sistemática constantes vitales como la temperatura o la presión arterial, no disponemos de una forma ágil para establecer la causa de la mayoría de las infecciones. Esta incapacidad para identificar en poco tiempo bacterias y virus peligrosos supone la muerte para numerosos pacientes. El proceso diagnóstico habitual tarda varios días y durante ese tiempo las enfermedades se extienden y se vuelven difíciles de tratar, especialmente en las personas más vulnerables, como los recién nacidos, los ancianos o aquellos con el sistema inmunitario debilitado.

Esas esperas persisten a pesar de los grandes avances técnicos que nos rodean. Las consecuencias son aún peores en pequeñas clínicas de África, donde los resultados de las pruebas tardan muchos más días. Durante ese tiempo, puede tratarse por error a los enfermos de malaria con medicamentos para el tifus, o se deja de mantener en cuarentena a los pacientes con ébola.

La lentitud de las pruebas se debe a que las «huellas moleculares» de las infecciones se ocultan entre todas las proteínas y partículas normales del organismo humano, por lo que en una muestra de sangre puede haber apenas mil marcadores específicos de bacterias flotando entre billones de moléculas irrelevantes. Para identificar un grupo lo suficientemente grande de moléculas y diagnosticar la infección se necesitan unos aparatos costosos y complejos que deben ser operados por científicos muy preparados en laboratorios especializados.

Sin embargo, estamos a punto de presenciar un gran avance. En vez de perder tiempo y de poner en peligro vidas transportando muestras de pacientes a los laboratorios donde se realizan las pruebas, podremos detectar e identificar las moléculas de la enfermedad en la misma consulta médica mientras el paciente espera unos veinte minutos. Lo lograremos con unos sensores minúsculos, de apenas una mil millonésima parte de un metro de diámetro, alojados en un pequeño cartucho de plástico. Solo hay que introducir una gota de sangre en el cartucho y se obtienen los resultados. Estos sensores reaccionan con rapidez ante niveles bajos de ADN bacteriano, en parte porque casi poseen sus mismas dimensiones.

El tamaño importa. Si bien una pequeña ola no movería un barco acorazado, sí agitaría de manera perceptible un bote de remos. De la misma forma, nuestros sensores nanométricos responden a estímulos del entorno (el líquido de una muestra de la sangre) que pasarían inadvertidos para un sensor de mayor tamaño. Además, lo hacen con una enorme rapidez.

Nuestro equipo se muestra ilusionado porque esos sistemas se someterán a ensayos clínicos este mismo año. Además, otros grupos han desarrollado métodos de diagnóstico prometedores de escala nanométrica. Los científicos

EN SÍNTESIS

Los análisis habituales para diagnosticar infecciones son lentos porque tardan en identificar una cantidad suficiente de ADN del patógeno.

Durante los largos días de espera, los pacientes pueden ser tratados con medicamentos inapropiados o no ser tratados en absoluto.

Nuevos dispositivos, basados en química nanométrica, podrían proporcionar resultados precisos en pocos minutos en la misma consulta médica.

GREG MABLY

llevan una década refinando técnicas para crear tales materiales, a menudo átomo a átomo. En laboratorios de todo el mundo se están diseñando dispositivos que reaccionen ante estímulos muy específicos con más rapidez que sus predecesores de mayor tamaño. Aunque nos mostramos cautelosos porque hemos visto fracasar en los ensayos clínicos prototipos muy exitosos, confiamos en que estos métodos nos permitan en algún momento mejorar la atención de los pacientes.

Shana O. Kelley es profesora de química, bioquímica, farmacia e ingeniería biomédica en la Universidad de Toronto. También es directora y accionista de Xagenic, compañía que comercializa la técnica descrita en el presente artículo.



UN ANZUELO PARA PATÓGENOS

Nuestro grupo emprendió esa línea de investigación hace unos diez años. Por aquella época nos interesaban los simples dispositivos portátiles que los diabéticos utilizaban para medir la glucosa en la sangre. El mecanismo es sencillo: las moléculas de glucosa proporcionan sus electrones para cerrar un circuito eléctrico y ello genera una corriente. Cuanta más glucosa haya en la sangre, más corriente se generará. Nos preguntábamos si podríamos utilizar esa misma estrategia para detectar secuencias de ADN y ARN de bacterias o virus, que constituyen marcadores específicos de una infección.

Para lograrlo, necesitábamos hallar una manera de atraer y atrapar algunas moléculas de ADN de los patógenos que pudiera haber en la muestra sanguínea de un paciente. Pero para «pescarlos» necesitábamos un anzuelo. Una característica importante de cualquier fragmento de ADN es que se unirá, de manera selectiva y firme, a otra secuencia de ADN que hayamos diseñado y sintetizado nosotros. De este modo, podíamos crear una secuencia que, a modo de cebo, se fijara específicamente al ADN de una cepa bacteriana de estafilococos. A continuación unimos esa molécula de cebo a un sensor, un filamento de oro de un milímetro de ancho, que había sido diseñado para que emitiera una corriente eléctrica cuando detectara el ADN bacteriano (el oro funciona bien porque es un buen conductor).

Además, como el ADN por sí solo no libera suficientes electrones para inducir una corriente eléctrica detectable en el filamento de oro, agregamos a nuestra muestra una molécula amplificadora a base de rutenio. Este metal posee carga eléctrica positiva, por lo que atrae al ADN, cuya carga es negativa. De esta manera, cuando una molécula de ADN se uniera a nuestro sensor, llevaría consigo el metal, y este complejo atraería fácilmente los electrones del filamento de oro, lo cual generaría un nivel de corriente que podríamos detectar. Si empleábamos diversas moléculas de cebo en la superficie de nuestros sensores, podríamos detectar el ADN de distintas clases de bacterias.

Desgraciadamente, el método no funcionó cuando se ensayó en situaciones reales. Si añadíamos grandes cantidades de ADN bacteriano (billones de moléculas) a nuestras muestras, el sistema funcionaba bien. Pero con valores de ADN más próximos a los de una muestra sanguínea extraída en un hospital (que suele contener unas mil moléculas o menos de ADN bacteriano) no obtuvimos una señal perceptible. Nos hallábamos muy lejos de nuestro objetivo.

Dedicamos un año a explorar todas las variables de nuestro sistema y a intentar entender por qué no lográbamos detectar concentraciones inferiores de ADN. Los resultados eran frustrantes. Ninguno de los ajustes que realizábamos aumentaba la sensibilidad del método. Un par de estudiantes incluso solicitaron ser transferidos a otros proyectos, mientras comenzaban a asaltarme las dudas sobre la validez de la estrategia y me preguntaba si mi grupo de investigación iba a sobrevivir.

Pero, finalmente, la suerte intervino. Un día, en 2004, nos hallábamos discutiendo sobre un proyecto distinto en el que también se empleaba oro pero a una escala mucho menor. En concreto, se utilizaban nanofilamentos de oro de apenas diez nanómetros de diámetro, un espacio que solo podría albergar cinco moléculas de ADN. Así que, solo por diversión y porque nada estaba funcionando, reemplazamos los filamentos de un milímetro de grosor que habíamos estado usando por esos nanofilamentos e hicimos algunos experimentos rápidos y groseros para ver qué sucedía.

Y algo pasó. Uno de los investigadores posdoctorales de mi laboratorio, Rahela Gasparac, entró corriendo en mi oficina con los resultados de la primera prueba. Los nanofilamentos habían aumentado la sensibilidad de detección en un millón de veces. Por un momento pensamos en salir a celebrarlo, pero antes teníamos que repetir los experimentos. Queríamos asegurarnos de que aquello que observábamos era real. Y resultó serlo: habíamos descubierto el modo de detectar esas mil moléculas que nos permitirían diagnosticar la enfermedad.

¿Por qué los nanofilamentos detectaban concentraciones mucho más bajas de ADN? Ello se debía a que su tamaño ejercía una profunda influencia en su forma. En la escala nanométrica, estos hilos mostraban pequeñas protuberancias puntiagudas que no aparecían en sus primos mayores, cuyo tamaño les hacía tener una superficie lisa. Dos moléculas de cebo situadas a ambos lados de una protuberancia poseían más espacio a su alrededor que si se hallaban juntas en la superficie plana del filamento más grande. Los líquidos podían desplazarse más fácilmente a través de ese espacio y, al transportar consigo las moléculas de ADN bacteriano, resultaba mucho más probable que el cebo entrara en contacto con ellas.

Aunque esos sensores funcionaban bien, nuestros estudiantes solo conseguían crear manualmente diez de ellos al día, y para su aplicación clínica necesitaríamos miles. Entonces recurrimos a un material que suelen emplear los científicos e ingenieros para la fabricación de dispositivos eléctricos: el silicio.

Los chips de silicio pueden recubrirse de electrodos y fabricarse en grandes cantidades. Nuestra intención era reproducir en los chips la superficie abrupta de los nanofilamentos, con protuberancias de 10 nanómetros, para aumentar la sensibilidad. Después de unos seis meses, hallamos una forma de conseguirlo mediante un proceso químico llamado galvanización. Empezamos creando estructuras microscópicas en el silicio y luego, mediante la galvanización, fuimos añadiendo encima capas muy finas de oro. Luego, nos dimos cuenta de que resultaba más rápido y fácil crear una especie de cúpula de oro con numerosas puntas. Si fijábamos moléculas de cebo en diferentes lados de las puntas, podíamos imitar la separación entre las protuberancias de los filamentos originales. Pero el tiempo de producción era clave: una galvanización prolongada haría que las estructuras resultaran inservibles, mientras que un tiempo corto las mantendría a la escala nanométrica.

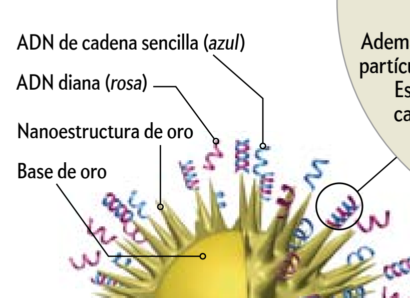
APLICACIÓN DE LA TÉCNICA

En los años siguientes demostramos que esos detectores nos permitían analizar marcadores de enfermedades infecciosas

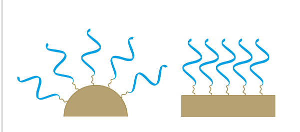
DIAGNÓSTICO

Dispositivo pequeño, reacción grande

Un nanosensor debe contar con tres rasgos para detectar las pocas moléculas de ADN bacteriano que hay en una gota de sangre. Primero, necesita un «cebo», esto es, moléculas que atraigan al ADN de bacterias específicas. Segundo, debe presentar el cebo en una superficie curvada y puntiaguda de escala nanométrica, la cual permite espaciar los cebos suficientemente para que el ADN diana se una a ellos. Finalmente, la unión del cebo y el ADN tiene que desencadenar una corriente eléctrica que pueda ser detectada por un sensor.



Además del cebo (*azul*), debe añadirse a la muestra partículas del metal rutenio, con carga positiva (+). Este es atraído por el ADN (*rosa*), que tiene carga negativa; cuando tal complejo se une al cebo y a los nanofilamentos de oro, desencadena en estos una corriente eléctrica (*flechas verdes*).



La curvatura nanométrica (*izquierda*) permite una mayor separación entre las moléculas de cebo, lo que aumenta el flujo entre ellas del ADN diana y la probabilidad de que lo atrapen. Los sensores de mayor escala poseen superficies planas (*derecha*) con cebos demasiado próximos entre sí.

DAISY CHUNG (*ilustración inserto*); GEORGE RETSECK (*nanosensor*)

causadas por bacterias y podíamos establecer la presencia o ausencia de estos patógenos en tan solo veinte minutos. Este tiempo de respuesta resultaba importante, porque permitía obtener un diagnóstico en el tiempo medio que dura una consulta médica. Otra característica de nuestro sistema es lo que llamamos «multiplexación», esto es, la capacidad de buscar patógenos distintos al mismo tiempo. Podíamos crear múltiples cúpulas de oro en la superficie de nuestros chips y unir distintos tipos de moléculas de cebo en cada cúpula. De esta manera, lograríamos identificar muchos tipos de patógenos con una sola gota de sangre, mientras que la mayoría de los otros sistemas solo reconocen un tipo de ADN patogénico cada vez. Uno de nuestros estudios más ambiciosos detectó veinte bacterias distintas de una vez, así como indicios de ADN de cinco tipos comunes de resistencia antibiótica con una precisión del 99 por ciento.

Con el objetivo de llevar la técnica a las consultas, pusimos en marcha una compañía, Xagenic, de la que soy directora técnica. La empresa ha construido unos cartuchos de plástico alrededor del sensor para albergar en ellos todo lo necesario en la prueba de diagnóstico. Para evaluar la precisión de estos cartuchos en el diagnóstico de dos enfermedades de transmisión sexual, la clamidia y la gonorrea, se realizarán unos ensayos clínicos a partir de este año. En los experimentos participarán médicos y pacientes de veinte centros de salud. Si esta primera etapa del ensayo resulta exitosa, tenemos planeado solicitar a la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU. la autorización para su comercialización.

La competencia en el campo de las nanotecnologías es muy alta. Algunas pruebas se centran en ciertos tipos de cáncer con una alta precisión. El grupo de Chad A. Mirkin, de la Universidad Noroccidental, por ejemplo, ha desarrollado unas nanoesferas de oro que reaccionan con el ADN del cáncer incluso antes de que las células malignas hayan formado tumores. David Walt, de la Universidad de Tufts, ha diseñado un sistema que permite estimar el número de marcadores moleculares del cáncer de un paciente, lo cual puede resultar extremadamente útil para el diagnóstico y la supervisión de la enfermedad. Sin embargo, tales estrategias están pensadas para su uso en laboratorios diagnósticos, y no en la consulta del médico.

Aun así, otras técnicas que persiguen el diagnóstico rápido se van acercando poco a poco a la práctica médica. El grupo de Rustem Ismagilov, del Instituto de Tecnología de California, ha desarrollado un dispositivo inalámbrico llamado SlipChip que detecta ADN y no precisa conectarse a la corriente. A principios de 2015, Samuel Sia, de la Universidad de Columbia, y sus colaboradores describieron en la revista *Science Translational Medicine* un pequeño dispositivo de análisis sanguíneo que se enchufa a un teléfono móvil y utiliza señales de anticuerpos para detectar el VIH.

Estoy convencida de que alguna de esas técnicas (o alguna otra totalmente diferente que no conocemos todavía) funcionará lo bastante bien como para poder introducirla en la práctica médica diaria. Cuando lleguemos a ese punto, reacciones que suceden en el espacio de un nanómetro darán lugar a una mejora sin precedentes en la salud de los pacientes.

PARA SABER MÁS

Miniature analytical methods for medical diagnostics. David R. Walt en *Science*, vol. 308, págs. 217-219, 8 de abril de 2005.
Drivers of biodiagnostic development. David A. Giljohann y Chad A. Mirkin en *Nature*, vol. 462, págs. 461-464, 26 de noviembre de 2009.
Advancing the speed, sensitivity and accuracy of biomolecular detection using multi-length-scale engineering. Shana O. Kelley et al. en *Nature Nanotechnology*, vol. 9, n.º 12, págs. 969-980, diciembre de 2014.
A digital microfluidic device with integrated nanostructured microelectrodes for electrochemical immunoassays. Darius G. Rackus et al. en *Lab on a Chip*, vol. 15, n.º 18, págs. 3776-3784, septiembre de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Nanotécnica en medicina. A. Paul Alivisatos en *IyC*, noviembre de 2001.
Detector de patógenos. David J. Ecker en *IyC*, agosto de 2014.
Nanotecnología para diagnosticar y curar enfermedades. Josh Fischman en *IyC*, junio de 2015.
Bengalas para detectar el cáncer. Joshua A. Krisch en *IyC*, junio de 2015.


MA
TI
OCH

CÓMO ADQUIEREN LOS BEBÉS EL LENGUAJE

Todos los bebés son lingüistas natos, capaces de dominar cualquiera de las 7000 lenguas del mundo como un nativo

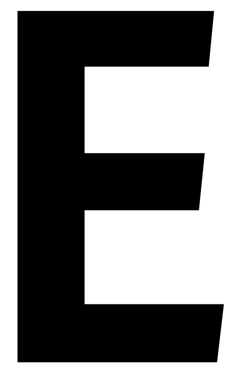
Patricia K. Kuhl





Patricia K. Kuhl es catedrática de aprendizaje infantil temprano de la Fundación de la Familia Bezos, codirectora del Instituto de Neurociencia y Aprendizaje de la Universidad de Washington y directora del Centro LIFE, un instituto de la Fundación Nacional para la Ciencia de EE.UU. especializado en el aprendizaje.





EL NIÑO DE CORTA EDAD POSEE UN DON TAN ASOMBROSO COMO EFÍMERO: LA HABILIDAD de dominar lenguas con desenvoltura. A los seis meses es capaz de aprender los sonidos que conforman las palabras de un idioma y, si escucha el quechua o el tagalo, pongamos por caso, también capta la fonética propia de ellos. A los tres años ya conversa con los padres, los compañeros de juego y los extraños.

Después de cuatro décadas dedicadas al estudio del desarrollo infantil no dejo de asombrarme de cómo el niño pasa en pocos años del balbuceo sin sentido a pronunciar palabras y frases articuladas, facultad compleja esta que surge con más rapidez que ninguna otra en el curso de la vida. Hasta hace pocos años, los neurocientíficos no habían conseguido formarse una idea general de lo que sucede en el cerebro del bebé en ese proceso de aprendizaje que separa los balbuceos del recién nacido de la entrañable locuacidad del niño.

En el momento de nacer, el cerebro del lactante puede percibir el total de 800 sonidos (fonemas) que pueden concatenarse para crear todas las palabras en cualquier lengua del globo. Nuestras investigaciones indican que, en el segundo semestre de vida, en el cerebro del niño se abre una puerta misteriosa. Se inicia un «período sensible», como lo califican los neurocientíficos, en que el órgano está listo para asimilar las primeras lecciones básicas de la magia del lenguaje.

El momento en que el bebé está más predispuesto a aprender los sonidos de la lengua materna comienza a los seis meses con las vocales y a los nueve con las consonantes. Al parecer, el período solo dura unos meses, pero se amplía en los niños que escuchan una segunda lengua, que aún podrán asimilar otro idioma con cierta soltura hasta los siete años.

La aptitud innata para el lenguaje no basta en sí misma para que pase de las primeras vocalizaciones, como «mamá» y «papá». La adquisición de competencia en la más importante de las habilidades sociales se consigue a base de oír horas y horas de charla en el absurdo lenguaje de la madresía. Las inflexiones exageradas «miii bebeé preciosooo» sirven al nada frívolo propósito de impartir las primeras lecciones de prosodia (entonación y ritmo) en la lengua materna del bebé. Nuestro trabajo pone punto y final al viejo debate de si los genes o el entorno prevalecen en el desarrollo inicial del lenguaje: ambos cumplen funciones preeminentes.

El conocimiento acerca del desarrollo inicial del lenguaje ha alcanzado tal refinamiento que está permitiendo a psicólogos y médicos concebir nuevos instrumentos útiles para los niños con problemas de aprendizaje. Los estudios han comenzado a sentar las bases para el uso del registro de las ondas cerebrales como medio para determinar si las aptitudes lingüísticas del niño siguen un curso normal, o si este corre el riesgo de ser autista o sufrir déficit de atención u otros trastornos. Algún día, la visita ordinaria al pediatra podrá incluir el examen cerebral del bebé, junto con las vacunas contra el sarampión, las paperas y la rubeola.

LAS ESTADÍSTICAS DEL LENGUAJE DEL BEBÉ

El motivo por el que barajamos un test de desarrollo del lenguaje es que comenzamos a saber cómo lo asimila el bebé con tanta desenvoltura. Mi laboratorio, entre otros, ha demostrado que el lactante recurre a dos mecanismos de aprendizaje en las primeras etapas de adquisición del lenguaje: uno reconoce los sonidos por cómputo mental y otro precisa una intensa inmersión social.

Para aprender a hablar, el bebé ha de conocer primero los fonemas que componen las palabras que escucha. Debe identificar una cuarentena, de los 800 que existen, para pronunciar las palabras de su lengua. Esta tarea exige percibir las sutiles diferencias de los sonidos hablados. El cambio de una sola consonante altera el significado de la palabra, *malo* o *palo*, por ejemplo. Y la pronunciación de una simple vocal, como la *ah* inglesa de los vocablos *Bach* y *rock*, varía enormemente según la persona que la emita, así como el ritmo y el contexto en que

EN SÍNTESIS

El cerebro del bebé entra en un período «sensible» a los seis meses de edad, el momento en que está mejor dotado para percibir los sonidos de una o dos lenguas y que lo prepara para adquirir la entonación y el ritmo fluido propios del hablante nativo.

La aptitud innata para el lenguaje no permite traspasar más allá de las primeras vocalizaciones como *mamá y papá*. Aprender la más importante de las habilidades sociales requiere la atenta escucha de incontables horas de charla parental.

Los conocimientos acerca de la adquisición temprana del lenguaje han alcanzado tal complejidad que se comienza a vislumbrar el uso de técnicas de exploración del cerebro para saber si el bebé evoluciona con normalidad.

EMILY MULLIN, HELLO ARTISTS (*vestuario y estilismo*); ABRAMS (*modelos*); HANNAH WHITAKER (*fotografías*)

lo haga. La enorme variación de los fonemas es la razón por la que el reconocedor de voz Siri de Apple no acaba de funcionar.

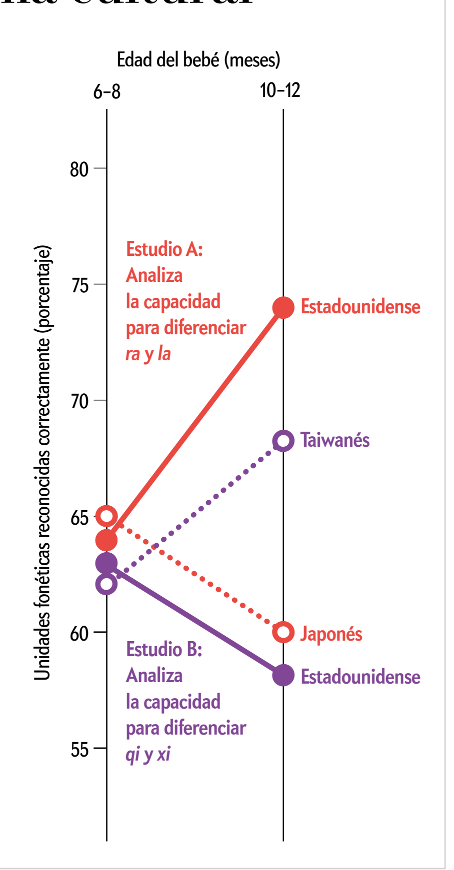
Mi trabajo y el de Jessica Maye, a la sazón en la Universidad Noroccidental, y sus colaboradores han demostrado que los patrones estadísticos (la frecuencia con que se pronuncian los sonidos) son primordiales en el aprendizaje de los fonemas más importantes. Entre los ocho y diez meses, el bebé no entiende las palabras. Pero es extremadamente sensible a la frecuencia con que aparecen los fonemas, eso que en estadística se conoce como frecuencias de distribución. Los fonemas elementales de una lengua son los más pronunciados. En inglés, por ejemplo, los sonidos *r* y *l* son bastante frecuentes. Aparecen en palabras como *rake* o *read* y *lake* o *lead*. En Japón, la *r* y la *l* inglesas también existen pero no son tan habituales. En cambio, el sonido de la *r* japonesa es muy minoritario en inglés. (La palabra japonesa *raamen* sonaría como *laamen* a los oídos de un estadounidense, puesto que la *r* japonesa está a medio camino entre la *r* y la *l* del inglés norteamericano.)

La frecuencia estadística de cada sonido deja su huella en el cerebro del bebé. En un estudio llevado a cabo con lactantes de Seattle y de Estocolmo, analizamos cómo percibían los sonidos vocálicos a los seis meses y constatamos que ambos grupos ya habían comenzado a fijarse en las vocales habladas en su lengua materna. La cultura oral ya impregnaba e influía en la percepción de los sonidos en el cerebro.

PERÍODO SENSIBLE

Escucha cultural

Entre el sexto y el octavo mes, los bebés discriminan las unidades fonéticas, como *ra* y *la*, sea cual sea la cultura en la que crecen. A los diez meses, esta ventana comienza a cerrarse y los bebés muestran los primeros indicios de que se están convirtiendo en oyentes culturales. En un estudio paralelo realizado en Tokio y Seattle, la capacidad de los bebés nipones para percibir la diferencia entre *ra* y *la* disminuyó, mientras que la de los estadounidenses mejoró en ese período (*líneas rojas*). Un estudio realizado en Taipéi y Seattle mostró que las aptitudes de los bebés taiwaneses para percibir la diferencia entre *qi* y *xi* mejoró; en cambio, la de los estadounidenses se redujo (*líneas moradas*). Los bebés hicieron instintivamente lo correcto para avanzar en la adquisición del lenguaje.



¿Qué sucedía exactamente? Maye ha demostrado que a esa edad el cerebro dispone de la plasticidad necesaria para modificar la percepción de los sonidos. Un bebé japonés que escuche los sonidos propios del inglés aprenderá a distinguir la *r* y la *l* tal y como se pronuncian en Estados Unidos. Y viceversa, un bebé criado entre anglohablantes podrá asimilar los sonidos característicos del japonés. Parece que el aprendizaje de los sonidos en el segundo semestre de vida crea conexiones neuronales para la lengua materna pero no para otras, a menos que el niño permanezca expuesto a varios idiomas en ese período.

En momentos posteriores de la infancia, y aún más en la edad adulta, el hecho de escuchar una lengua nueva no da unos resultados tan sensacionales; cualquiera que viaje a Francia o a Japón escuchará las distribuciones estadísticas de los sonidos de otra lengua, pero el cerebro no cambiará de resultas de la experiencia. Por eso es tan difícil aprender otro idioma a ciertas edades.

Una segunda modalidad de aprendizaje estadístico permite a los bebés reconocer palabras enteras. De adultos, sabemos distinguir dónde acaba una palabra y comienza la siguiente. Pero la habilidad para separar las palabras en el torrente del habla exige un procesamiento mental complejo. El discurso hablado llega al oído en forma de una sucesión ininterrumpida de sonidos, sin los espacios en blanco del texto escrito.

Jenny Saffran, actualmente en la Universidad de Wisconsin-Madison, y sus colaboradores (Richard Aslin, de la Universidad de Rochester, y Elissa Newport, ahora en la Universidad de Georgetown) descubrieron que el bebé recurre al aprendizaje estadístico para entender los sonidos de las palabras enteras. A mediados de los noventa, el grupo de Saffran demostró que los bebés de ocho meses pueden aprender seudopalabras basándose en la probabilidad de que una sílaba siga a otra. Tomemos la frase «bebé lindo». Es más probable escuchar la sílaba *lin* junto con *do* que acompañando a otra sílaba, como *be*.

En el experimento, Saffran hizo escuchar a los bebés sartas de palabras polisilábicas sin sentido, generadas por la voz sintética de un ordenador, algunas de cuyas sílabas aparecían juntas con mayor frecuencia que otras. La capacidad de los niños para reconocer las sílabas que coincidían en el lenguaje inventado les permitió identificar palabras probables.

El descubrimiento de las capacidades de aprendizaje estadísticas del lactante en los años noventa desató una gran expectación, porque ofrecía una teoría del aprendizaje del lenguaje que trascendía la idea predominante de que el niño solo aprende por condicionamiento de los padres y por las afirmaciones sobre si una palabra es correcta o errónea. En realidad, todo comienza antes de que los padres se percaten. Pero otra serie de ensayos en mi laboratorio condujo a un nuevo hallazgo que imprime un matiz importante a esta historia: el proceso de aprendizaje estadístico no precisa únicamente de la escucha pasiva.

MEJOR DE TÚ A TÚ

En el curso de nuestras investigaciones hemos averiguado que los bebés necesitan ser algo más que genios del cómputo para

DAISY CHUNG (*gráfica*)

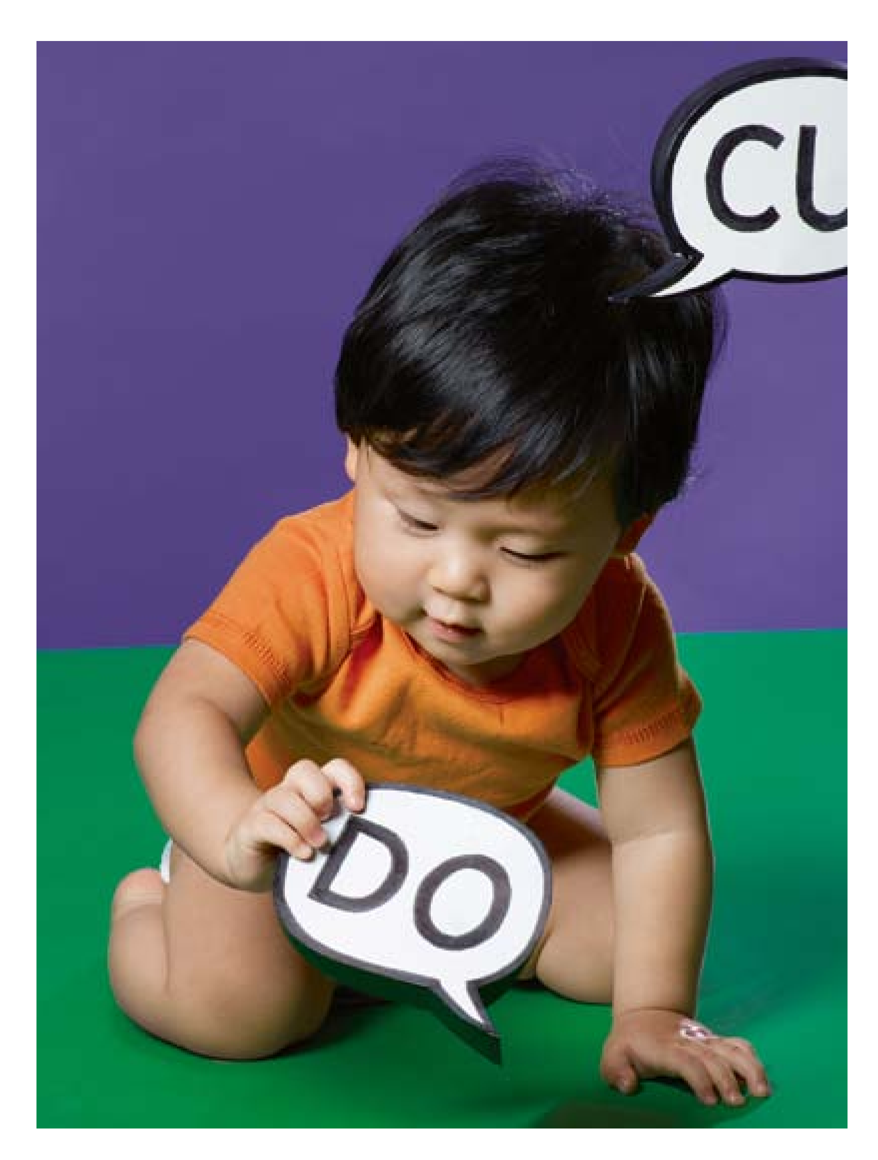
procesar los complejos algoritmos neuronales. En 2003, publicamos las conclusiones de una serie de experimentos en los que bebés de nueve meses de Seattle escuchaban chino mandarín. Queríamos saber si las aptitudes de aprendizaje estadísticas les permitirían adquirir la fonética de ese idioma.

En grupos de dos o tres, los niños oyeron a hablantes nativos de mandarín mientras sus profesores jugaban con ellos con libros y juguetes en el suelo. Otros dos grupos escucharon también mandarín: uno visionó un vídeo en que se hablaba esta lengua y el otro solo oyó una grabación de voz. Un cuarto grupo, el de control, no escuchó mandarín, sino a graduados estadounidenses que hablaban en inglés mientras jugaban con ellos con los mismos libros y juguetes. Todo esto sucedía en 12 sesiones en el transcurso de un mes.

Los cuatro grupos regresaron al laboratorio donde fueron sometidos a test psicológicos y monitorización cerebral para evaluar su capacidad de reconocer los fonemas del mandarín. Solo el grupo expuesto al chino hablado en vivo por las cinco personas aprendió a reconocer los fonemas extraños. Tanto que sus resultados igualaron los de bebés de Taipéi que habían escuchado a sus padres en los primeros 11 meses de vida.

Los que oyeron el mandarín a través de la televisión o de las grabaciones de voz no aprendieron nada. Su capacidad para distinguir fonemas no se diferenció de la de los bebés del grupo de control, que, como era de prever, no mejoró con el experimento.

El estudio aporta pruebas de que el aprendizaje no es un proceso pasivo en el cerebro del bebé. Precisa de la relación con congéneres, una necesidad que yo llamo el «resorte social». Esta hipótesis puede ampliarse para explicar el modo en que muchas especies aprenden a comunicarse. La experiencia de un niño pequeño que está aprendiendo a hablar se asemeja al modo en que un pájaro aprende a cantar.



El aprendizaje del cerebro infantil no es un proceso pasivo. La interacción social constituye un requisito básico para el dominio del lenguaje

En su día trabajé con la añorada Allison Doupe, de la Universidad de California en San Francisco, para comparar el aprendizaje de los bebés y el de los pájaros. Descubrimos que, tanto en los niños como en los diamantes mandarines, la experiencia social en los primeros meses de vida resultaba esencial. Bebés y polluelos se sumergen en la escucha de sus mayores y guardan en su memoria los sonidos que oyen. Estos recuerdos condicionan las regiones motoras del cerebro para emitir sonidos que emulen los que perciben habitualmente en la colectividad donde crecen.

El modo exacto en que el contexto social contribuye al aprendizaje de una lengua sigue siendo una cuestión no resuelta. Pero mi propuesta es que los padres y demás adultos aportan tanto la motivación como la información necesaria para facilitar el aprendizaje del bebé. El componente motivacional depende de los sistemas de recompensa del cerebro, en particular de las regiones que segregan dopamina durante la interacción social. Los trabajos en mi laboratorio ya han demostrado que los niños aprenden mejor en compañía de iguales; estamos embarcados en estudios que explican la razón de ello.

Los bebés que miran a los ojos de los padres también reciben señales sociales clave que aceleran el paso a la siguiente etapa del aprendizaje lingüístico: conocer el significado de las palabras. Andrew Meltzoff, de la Universidad de Washington, ha demostrado que los niños pequeños que siguen la mirada de los

adultos pueden asimilar más vocabulario en los dos primeros años que aquellos que no siguen los movimientos oculares. La vinculación entre la mirada y el habla es perfectamente lógica y explica en parte por qué no bastan los vídeos educativos.

Los bebés del grupo que recibió cinco lecciones podían ver a su profesor de mandarín mirar un objeto mientras lo nombraba, una acción sutil que vincula la palabra con el objeto mentado. En un artículo aparecido en julio del año pasado, también mostramos que cuando un profesor de español sostenía juguetes nuevos y hablaba de ellos, los bebés cuya mirada alternaba entre él y el juguete, en lugar de fijarla en uno o en otro, aprendían la fonética y las palabras usadas en la sesión de estudio. Este ejemplo ilustra mi teoría de que las habilidades sociales del lactante facilitan, o actúan como «resorte», del aprendizaje del lenguaje.

La idea del componente social de la asimilación de la lengua podría explicar también algunas de las dificultades que afrontan los bebés con trastornos del desarrollo como el autismo. Los niños autistas carecen del interés básico por hablar. En lugar de ello, fijan su vista en objetos inanimados y no prestan atención a las pistas sociales tan esenciales para adquirir la lengua.

«DI, ¡HOLAAAAA!»

La aptitud para aprender a hablar no solo depende de si el bebé es capaz de escuchar a los adultos, sino también de la manera en que los mayores se dirigen a él. Ya sea en Dacca, París, Riga o en la reserva india de Tulalip cercana a Seattle, los investigadores que escuchan conversar a las personas con un niño han aprendido una verdad esencial: los adultos hablan con los niños de una manera peculiar y distinta de cuando lo hacen entre sí. Los etnógrafos culturales y los lingüistas la han bautizado madresía, o «maternés», y está presente en casi todas las culturas. En un principio se dudaba de si entorpecería la asimilación del lenguaje. Pero, muy al contrario, numerosos estudios han demostrado que la facilita. De hecho, no es un invento moderno: Varrón (116 a 27 a.C.), un erudito en sintaxis de la Roma clásica, observó que algunas palabras apocopadas solo se usaban con los bebés y los niños pequeños.

Mi laboratorio (así como el de Anne Fernald, en la Universidad Stanford, y el de Lila Gleitman, en la Universidad de Pensilvania) ha estudiado los rasgos sonoros propios de la madresía que llaman la atención de los bebés: el tono agudo, el ritmo lento y la entonación exagerada. Si pueden elegir, los bebés prefieren escuchar grabaciones breves de madresía en lugar de las charlas de las mismas madres con adultos. El tono agudo parece actuar como un reclamo que capta su atención.

La madresía acentúa las diferencias entre los sonidos, lo que hace más fácil distinguir un fonema de otro. Nuestros estudios demuestran que el habla exagerada probablemente ayuda a los bebés a recordar los sonidos. En un trabajo reciente de mi grupo, Nairán Ramírez-Esparza, ahora en la Universidad de Connecticut, vistió a bebés con pequeños chalecos dotados de un magnetófono miniaturizado de alta fidelidad que llevaban puestos en casa todo el día. Las grabaciones nos permitieron entrar en el mundo auditivo de los niños y demostraron que, si los padres les hablaban en maternés a esa edad, un año después habían aprendido más del doble de palabras que aquellos cuyos padres no hablaban la lengua infantil con tanta frecuencia.

PRUEBAS REVELADORAS DEL APRENDIZAJE

Los especialistas que estudian el desarrollo del cerebro infantil no ocultan su expectación ante la posibilidad de usar los conocimientos sobre el desarrollo temprano para descubrir biomarcadores de la actividad cerebral, señales distintivas que aporten pistas reveladoras de problemas del lenguaje. En otro estudio reciente de mi laboratorio, se hizo escuchar palabras conocidas y desconocidas a niños de dos años de edad con trastorno del espectro autista, al mismo tiempo que se monitorizaba la actividad eléctrica de su cerebro.

Descubrimos que el grado en que aparecía un trazado concreto de las ondas cerebrales como respuesta a palabras conocidas predecía las futuras aptitudes cognitivas y lingüísticas del niño entre los cuatro y seis años de edad. Estas mediciones evaluaron el éxito del niño para aprender de otras personas. Y han revelado que la habilidad para aprender palabras socialmente es un buen presagio del aprendizaje en general.

Las perspectivas de medir el desarrollo cognitivo del bebé y del niño pequeño están mejorando gracias a nuevas herramientas que juzgan su capacidad para reconocer sonidos. Mi grupo de investigación ha comenzado a emplear la magnetoencefalografía (MEG), una técnica de imagen inocua, para ver cómo responde el cerebro al habla. El aparato contiene 306 sensores SQUID (dispositivo superconductor de interferencia cuántica) en el interior de una carcasa cuyo aspecto recuerda a un secador de pelo. Cuando el bebé se sienta en él, los sensores miden los diminutos campos magnéticos que indican la activación específica de las neuronas en el cerebro mientras el niño oye hablar. Con la MEG hemos constatado la existencia de un período crítico en que el bebé parece ejecutar pruebas mentales como preparación para hablar su lengua materna.

La MEG es demasiado costosa y compleja para ser utilizada en un centro de atención primaria. Pero esos estudios allanan el camino para descubrir biomarcadores que puedan medirse con sensores portátiles y baratos, utilizables fuera de un laboratorio universitario.

Si se lograran identificar unos biomarcadores fiables del aprendizaje lingüístico, ayudarían a saber si los niños crecen con normalidad o tienen riesgo de sufrir trastornos del lenguaje propios de los primeros años de vida, como el trastorno del espectro autista, la dislexia o el síndrome del X frágil, entre otros. Conocer en profundidad la singular capacidad del cerebro humano para el lenguaje, y saber en qué momento exacto es posible modelarla, tal vez nos permita aplicar terapias con la antelación suficiente para cambiar el futuro del niño.

PARA SABER MÁS

The scientist in the crib: Minds, brains, and how children learn. Alison Gopnik, Andrew Meltzoff y Patricia K. Kuhl. William Morrow, 1999.
Brain mechanisms in early language acquisition. Patricia K. Kuhl en *Neuron*, vol. 67, n.º 5, págs. 713-727, 9 de septiembre de 2010.
Brain responses to words in 2-year-olds with autism predict developmental outcomes at age 6. Patricia K. Kuhl et al. en *PLOS ONE*, vol. 8, n.º 5, art. e64967, 29 de mayo de 2013.
Early language learning and the social brain. Patricia K. Kuhl en *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, vol. 79, págs. 211-220, 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Percepción del habla en la primera infancia. Peter D. Eimas en *IyC*, marzo de 1985.
Así piensan los bebés. Alison Gopnik en *IyC*, septiembre de 2010.
La percepción del habla en los bebés. Ferran Pons en *MyC* n.º 45, 2010.
El cerebro bilingüe. Albert Costa, Mireia Hernández y Cristina Baus en *MyC* n.º 71, 2015.
Aprender a hablar. Anneke Meyer en *MyC* n.º 76, 2016.

Dietrich Lemke es director emérito del Instituto Max Planck de Astronomía de Heidelberg.



HISTORIA DE LA CIENCIA

FRAUNHOFER Y EL ESTUDIO DEL ESPECTRO SOLAR

A principios del siglo XIX, un óptico autodidacta y sin formación académica revolucionó la fabricación de lentes y logró un descubrimiento que resultaría clave en el desarrollo de la espectroscopía

Dietrich Lemke

«CON EL PRISMA EN LA MANO, SE YERGUE ANTE NOSOTROS en su efigie mineral: el Newton de Baviera, Joseph von Fraunhofer.» De esta manera comenzaba el texto conmemorativo publicado en 1865 con ocasión de la inauguración de la estatua de bronce de Fraunhofer en la calle Maximilian de Múnich.

Semejante reconocimiento no era exagerado. Fraunhofer no solo realizó importantes descubrimientos científicos, sino que puso los cimientos de la industria óptica de precisión en Alemania, que tanta fama mundial adquiriría. A él le debemos la fabricación de lentes uniformes y con propiedades ópticas bien determinadas. Descubrió más de 500 líneas oscuras en el espectro solar, las cuales empleó para determinar la potencia y la capacidad de dispersión de lentes fabricadas con distintos tipos de vidrio fundido. Construyó lentes acromáticas para los mejores y mayores telescopios de la época, lo que permitiría a astrónomos como Bessel, Struve y Galle conquistar un nuevo mundo científico.

Fraunhofer logró todos esos avances en apenas dos decenios, en una vida que comenzó con dificultades y que terminó demasiado pronto. Cuarenta y cinco años después del hallazgo de las líneas de Fraunhofer, Gustav Kirchhoff y Robert Bunsen reconocieron en ellas las huellas de identidad de los elementos químicos presentes en el Sol: un hito que marcó el comienzo de la exploración astrofísica del universo.

Joseph Fraunhofer vino al mundo el 6 de marzo de 1787 como undécimo hijo de un cristalero de Straubing, en la Baja Baviera.

SERIE

LOS ORÍGENES DE LA ESPECTROSCOPÍA

EN SÍNTESIS

A principios del siglo XIX era muy difícil fabricar vidrios ópticos de buena calidad. Joseph Fraunhofer ideó ingeniosos procedimientos para determinar las propiedades ópticas de los vidrios y fabricar piezas más puras.

En su búsqueda de un método para medir con precisión la dispersión de sus lentes y eliminar la aberración cromática de los objetivos, Fraunhofer descubrió la existencia de múltiples líneas oscuras en el espectro solar.

Movido por la curiosidad, Fraunhofer también analizó la luz de Venus, la Luna y la de varias estrellas fijas. Aunque su principal motivación era técnica, aquellos hallazgos sentarían más tarde los fundamentos de la espectroscopía.

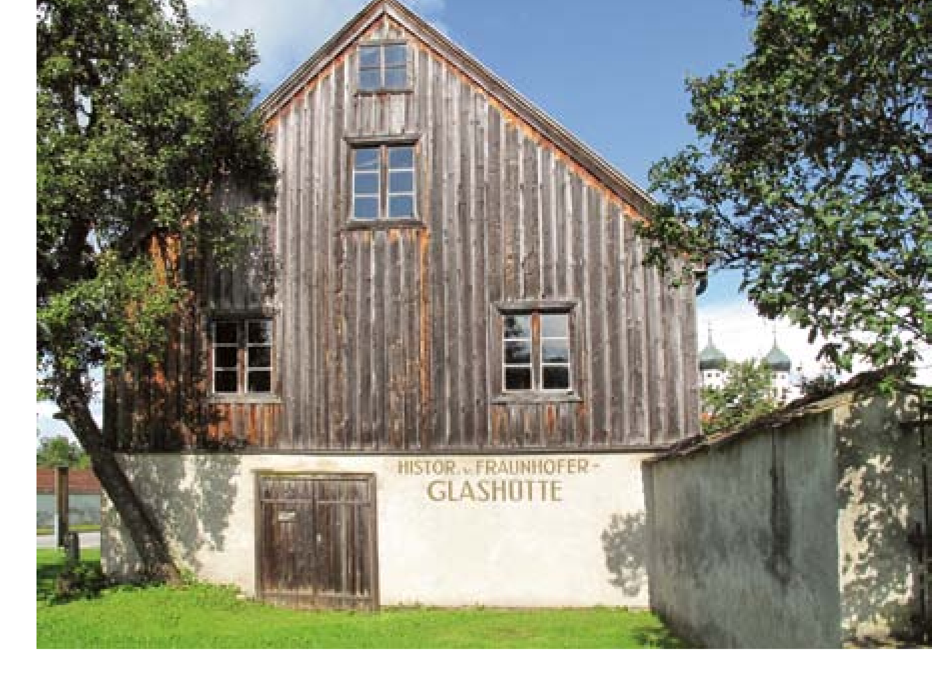
CORTESÍA DEL AUTOR



ESTATUA de Joseph Fraunhofer en la calle Maximilian de Múnich, junto al Museo de los Cinco Continentes.

Seis de sus hermanos habían muerto ya, y a los 12 años quedó huérfano de padre y de madre. Sus tutores le mandaron a Múnich para que ejerciese como aprendiz de Phillip Weichselberger, tallador de vidrio y proveedor de espejos de la corte. El pequeño Joseph no dominaba bien la lectura y la escritura; el maestro vidriero le había prohibido asistir a la escuela dominical, predecesora de las actuales escuelas de artes y oficios.

Pero, en su tercer año como aprendiz, un terrible accidente acabaría dando un giro a su vida. En julio de 1801 fue necesario reparar los endebles muros de la casa de Weichselberger, situada junto a la catedral. El edificio se derrumbó durante las obras y, con él, se desmoronó también la vivienda contigua. Joseph quedó sepultado bajo una montaña de escombros, pero una voz pidió auxilio desde el interior. Quienes corrieron a ayudar encontraron al joven atrapado en un hueco formado por cajas y marcos de puerta. Tras cuatro angustiosas horas, pudieron rescatarlo levemente herido.



La noticia de la desgracia se extendió con rapidez por la capital, por lo que el príncipe elector Maximiliano se apresuró hacia allí: «Ya no será más un huérfano, a partir de ahora yo seré su padre», proclamó. Citó al aprendiz, que por entonces contaba 14 años, a que acudiera al palacio de Nymphenburg una vez sanado y le entregó 18 ducados. También visitó el lugar del desastre Joseph von Utzschneider, consejero de la corte que, por entonces, ya había hecho importantes contribuciones a Baviera como servidor del Estado y polifacético empresario. Enterado del interés que el joven sentía por la óptica, le entregó varios manuales de la disciplina. El maestro Weichselberger ya no podía prohibir a su aprendiz que asistiese a la escuela dominical.

Durante las escasas horas libres del domingo, Fraunhofer se enfrascaba en los libros de óptica teórica recomendados por Utzschneider. Los conocimientos prácticos sobre la elaboración de lentes los adquirió gracias al fabricante de gafas Joseph Niggl, vecino suyo. En su taller se percató de los fallos que allí se cometían debido a la falta de conocimientos físicos y matemáticos. Fue así como, a los 17 años, Fraunhofer decidiría dedicar su vida a combinar la teoría y la práctica de la óptica, cabe presumir que con la intención de convertirse en un mejor fabricante de gafas. Con el dinero que había recibido del príncipe pudo liberarse de su último semestre de aprendiz, concluir con éxito los estudios en la escuela dominical e incluso comprar una amoladora óptica de segunda mano.

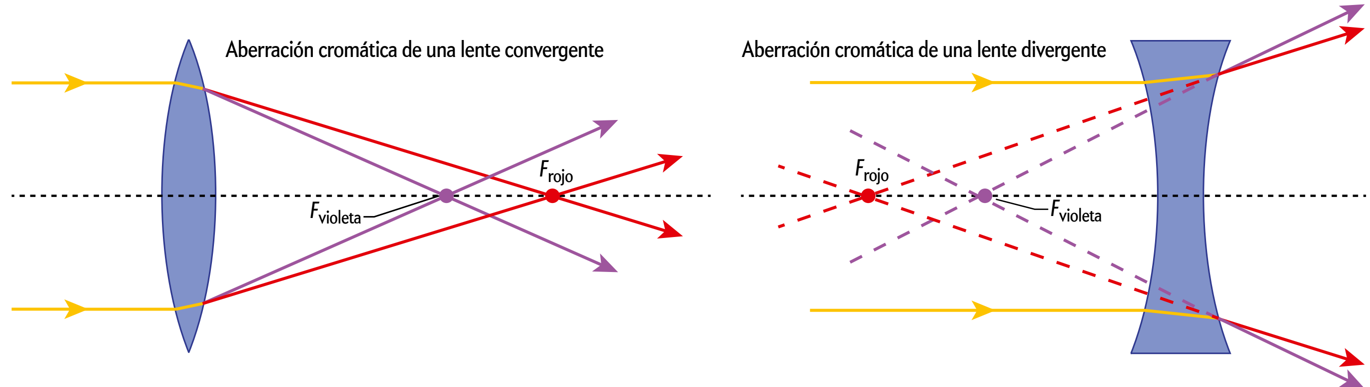
Fraunhofer buscó primero ganarse la vida mediante la confección de tarjetas de visita, pues también había aprendido por sí solo el arte del grabado. Pero Baviera se hallaba entonces bajo una fuerte influencia francesa y Napoleón preparaba una nueva guerra, por lo que la demanda de tarjetas era modesta. Falto de dinero, volvió de nuevo a trabajar para Weichselberger, ahora como oficial. Pero, debido a lo funesto de sus relaciones, el joven fue liberado de sus obligaciones un año y medio después.

«EL HOMBRE QUE NECESITAMOS»

Utzschneider se acordó de su joven protegido cuando tuvo que buscar un óptico. En 1804, junto con el dotado inventor de máquinas Georg von Reichenbach y el relojero Joseph Liebherr, Utzschneider había fundado en Múnich un instituto óptico-mecánico. Las perspectivas para una empresa así eran buenas, pues los franceses necesitaban mapas militares y en Baviera había un gran interés por la agrimensura, útil para la imposición de tributos a los terratenientes. Dicha actividad se efectuaba entonces mediante la triangulación, y los teodolitos para la medición precisa de ángulos los fabricaría el nuevo taller. Reichenbach creó unos instrumentos de medida mecánicos de primera calidad, con la mejor determinación de ángulos del mundo. Para los artefactos ópticos se recurrió en un principio a proveedores de vidrio ingleses; las lentes se tallaban en el instituto, y en ello colaboraría Fraunhofer.

Tras el convincente resultado de su examen de ingreso, el joven se incorporó al instituto en 1806. Ya desde el primer encuentro con el perspicaz Reichenbach, este quedó asombrado con sus conocimientos de óptica: «Este es el hombre que necesitamos, el que nos dará lo que todavía nos falta». Junto con el fabricante de gafas Niggl, que también trabajaba en el instituto, Fraunhofer efectuó los cálculos y talló las lentes para los telescopios y los microscopios de lectura de los instrumentos de medida.

CORTESÍA DEL AUTOR (*fotografías*); STERNE UND WELTRAUM (*gráfico*)





LA FÁBRICA DE VIDRIO en el municipio bávaro de Benediktbeuern (*izquierda*) se construyó en un edificio anejo al taller de mecanizado. Un caz de molino proporcionaba energía hidráulica y en dos grandes hornos se fundía el vidrio con fuego de leña. Los crisoles se introducían con grúas giratorias en los hornos y se cerraban con una tapa. Sobre los hornos (*derecha*) se distinguen restos de los agitadores y, encima, una pantalla de chapa. Pese a las elevadas temperaturas que se alcanzaban en la fundición, de unos 1300 grados centígrados, parece que el edificio nunca se incendió. La fábrica, conservada en gran medida en su forma original, es hoy un museo gestionado por la Sociedad Fraunhofer.

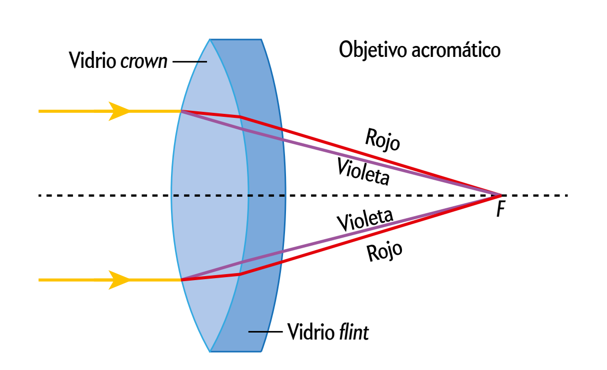
En lo referente al vidrio, Utzschneider no quería depender de la importación de unos materiales que, además, no gozaban de la calidad suficiente, pues llegaban atravesados por franjas onduladas. Con el bloqueo continental de Napoleón, los suministros ingleses pronto dejaron de recibirse. De modo que Utzschneider fundó su propia fábrica de vidrio en la abadía del municipio de Benediktbeuern, una vez que hubo comprado la propiedad tras su secularización. Un año después de la incorporación de Fraunhofer, la división de óptica del instituto se trasladó a Benediktbeuern y, muy pronto, se encargó a Fraunhofer la dirección del taller.

Fraunhofer aplicó la amoladora pendular, inventada por Reichenbach, a la fabricación de lentes de alta calidad, creó una nueva pulidora e introdujo la técnica de comprobación de superficies ópticas por medio de los anillos de Newton, un patrón de interferencia creado por la reflexión de la luz entre dos superficies casi paralelas. El joven modernizó el proceso de fabricación y estableció un control de calidad moderno. Todo ello convenció hasta tal punto a los propietarios que, en 1809, firmaron con Fraunhofer un acuerdo por el que este se convertía en socio de un futuro instituto de óptica autónomo. El contrato excluía trabajar en sistemas ópticos de espejo: Utzschneider necesitaba buenas lentes ante la creciente producción de instrumentos de medida de su instituto muniqués, y las perspectivas de venta mejoraban debido al auge de la agrimensura en Europa.

El fabricante de vidrio en Benediktbeuern, Pierre Louis Guinand, al que Utzschneider había conocido en un viaje por Romandía, había construido una fundición en un anexo al taller de mecanizado del vidrio. Pero los fundidos, sobre todo los de arena de sílice, carbonato potásico y cal, disolvían las paredes de chamota de los crisoles. Aquel efecto era peor con el vidrio *flint* (más pesado, con dióxido de plomo en vez de cal) que con el *crown*. Como consecuencia, la fracción de vidrios utilizables apenas ascendía a una cuarta parte, y las piezas sin inhomogeneidades a franjas eran demasiado escasas para construir lentes para objetivos grandes. A fin de conseguir vidrios sin irregularidades, Guinand incorporó agitadores en los crisoles. Aquella innovación mejoró el proceso, pero los agitadores contaminaban los fundidos. Tales deficiencias en la fabricación lastraban el desarrollo de la empresa, por lo que Utzschneider volvió a apostar por Fraunhofer. En 1811, a sus 24 años, el joven se hizo cargo de los trabajos de fundición y el veterano Guinand, de 63 años de edad, abandonó Benediktbeuern.

Fraunhofer abordó la nueva tarea mediante una serie de experimentos muy bien planificados. Los materiales en bruto se seleccionaban cuidadosamente y se depuraban sin reparar en gastos. Se realizaron muchas pequeñas fundiciones de prueba y se construyeron crisoles más resistentes. Gracias a ello, fue aumentando poco a poco la calidad de los vidrios y el tamaño de las piezas sin inhomogeneidades. Ya en 1812, fue posible suministrar al Observatorio de Nápoles un «telescopio gigante» con un objetivo acromático de 19,5 centímetros.

Al disponer de vidrios bien acabados y mejores procedimientos de mecanizado, pulido y control de las lentes, Fraunhofer pudo dedicarse a perfeccionar la acromaticidad de sus objetivos de telescopio, cada vez mayores. Estos constaban de un sistema acromático de dos lentes: una convergente, de vidrio *crown*, y otra divergente, de vidrio *flint*, más dispersor. Que la distancia focal de la segunda fuese mayor que la de la primera alargaba la distancia focal del objetivo, pero, a cambio, hacía que el rojo y el azul convergiesen en el mismo punto. Para librarse de los azares derivados de probar con distintas combinaciones de lentes, Fraunhofer intentaba medir con gran detalle la potencia y la dispersión de cada una y emplear siempre el tipo de vidrio adecuado. Buscaba diseñar combinaciones oportunas de lentes para fabricar por encargo objetivos libres de aberraciones.



CORRECCIÓN CROMÁTICA: Buena parte de las investigaciones de Fraunhofer buscaban suprimir la aberración cromática, el fenómeno por el que una lente hace converger los rayos de colores distintos en puntos focales *F* diferentes (*izquierda*). Este efecto puede subsanarse mediante la combinación con una lente divergente (*centro*). La lente acromática resultante (*derecha*) se caracteriza por una distancia focal mayor que la de la lente convergente.

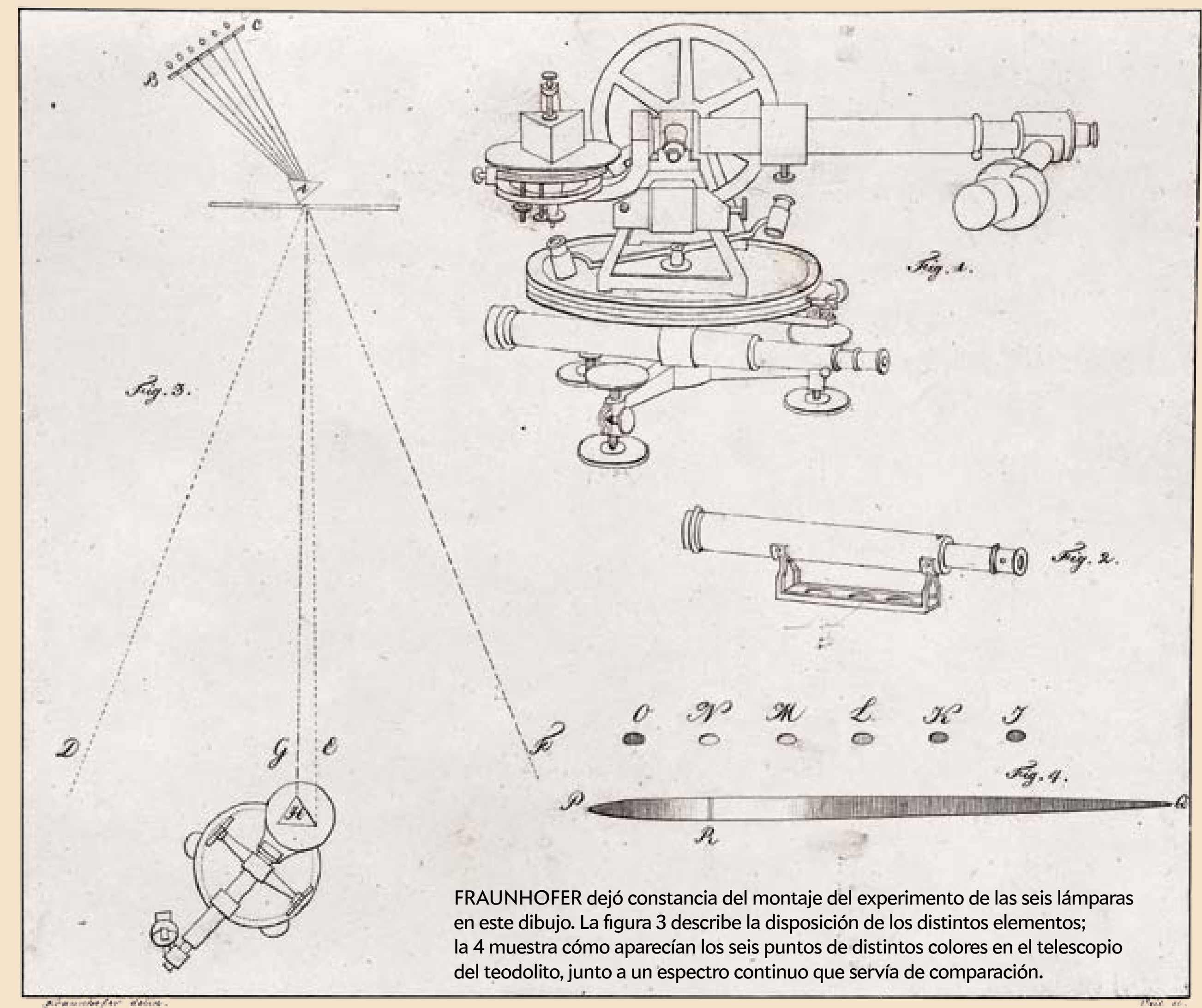
El experimento de las seis lámparas

Fraunhofer intentó determinar de manera sistemática las propiedades de sus piezas ópticas. Para medir la potencia y la capacidad de dispersión de sus lentes en función del color de la luz, concibió el famoso experimento que, con ayuda de sus dibujos originales, describimos a continuación.

Tras un postigo con una fina ranura se encuentra un prisma de vidrio *flint* (*A, Fig. 3*). Lo iluminan desde atrás seis lámparas (*B* a *C*) separadas entre sí un centímetro y medio y situadas tras pequeñas rendijas. Al respecto, Fraunhofer escribió: «La luz de las lámparas que cae sobre el prisma *A* se refracta en este, se descompone en colores y en ese estado atraviesa la rendija del postigo; los rayos rojos de la lámpara *C*, por ejemplo, van a *E*, y los violetas, a *D*; los rayos rojos de la lámpara *B* van a *F*, los violetas, a *G*, etcétera».

A 200 metros del prisma *A*, en otro edificio, se encontraba un teodolito (*Fig. 1 y parte inferior de la Fig. 3*) ante cuyo telescopio se colocaba un prisma (*H, Fig. 3*) cuya capacidad dispersora había que determinar. A causa de la gran distancia, los rayos de luz que llegaban a *H* eran casi paralelos. «El prisma *H* solo puede recibir de la lámpara *C* los rayos rojos, ya que los demás, como los violetas que van a *D*, no se encuentran con el prisma; de la lámpara *B*, en cambio, recibe solo los rayos violetas, y, de cada una de las lámparas, rayos de luz de otro color, todos los cuales proceden de un mismo punto [la rendija ante el prisma *A*].»

En el telescopio del teodolito, situado tras el prisma *H*, se observaban de este modo seis puntos luminosos separados entre sí y de colores distintos (*Fig. 4*): de derecha a izquierda, el violeta (*I*), el azul (*K*) y el verde (*L*) hasta el rojo (*O*), cada uno de los cuales era casi monocromático. Ello permitió a Fraunhofer medir por separado el ángulo de desviación de cada rayo: «Cuanto mayores son las distancias *ON*, *NM*, etcétera, tanto



FRAUNHOFER dejó constancia del montaje del experimento de las seis lámparas en este dibujo. La figura 3 describe la disposición de los distintos elementos; la 4 muestra cómo aparecían los seis puntos de distintos colores en el telescopio del teodolito, junto a un espectro continuo que servía de comparación.

MUSEO ALEMÁN, MÚNICH



ESPECTROSCOPIO con telescopio de teodolito y prisma empleado por Fraunhofer en el experimento de las seis lámparas. El prisma, colocado sobre una pequeña plataforma delante del telescopio, se componía del vidrio cuyas propiedades ópticas había que determinar. El original se encuentra hoy en el Museo Alemán de Múnich.

mayor es la capacidad dispersora del vidrio. [...] Con el telescopio del teodolito puede medirse con precisión el ángulo que el rayo incidente subtiende con cada uno de los refractados, lo que permite determinar [...] en cada medio refringente la capacidad refractiva para los rayos de luz de cada color».

Una vez establecido con precisión el ángulo δ_{min}, correspondiente a la menor desviación (cuando el rayo atraviesa simétricamente el prisma), y el ángulo interno del prisma, ε, se sigue que el índice de refracción asociado a cada color, o longitud de onda, viene dado por:

$$n = \frac{\mathrm{sen}\,((\delta_{min} + \varepsilon)/2)}{\mathrm{sen}\,(\varepsilon/2)} .$$

Puesto que el aparato de medida era propenso a sufrir desajustes, Fraunhofer dispuso sobre las seis lámparas otra más, cuyo espectro continuo (*banda entre P y Q, Fig. 4*) se observaba al mismo tiempo con el telescopio del teodolito. La banda brillante entre amarilla y rojiza (*R, Fig. 4*) que, en palabras de Fraunhofer, «se ve en los espectros que proceden de la luz del fuego» tenía que refractarse bajo el punto luminoso *N*; en caso contrario, el montaje se reajustaba. Hoy sabemos que dicha franja corresponde a la línea *D* del sodio.

DE LAS LENTES AL ESPECTRO SOLAR

Sin embargo, las propiedades ópticas de los distintos tipos de vidrio dependían del color; es decir, de la longitud de onda de la luz, por lo que Fraunhofer se puso como meta generar luz monocromática. Para ello empleó una lámpara de aceite que, colocada tras un prisma, producía un espectro en el que se sucedían sin discontinuidades todos los colores. Después intentó filtrarlos con vidrios y líquidos tintados. «Solo que no tuve la dicha de encontrar tal cosa», relató en su memoria para la Academia de Múnich. «En todos, la luz blanca que incidía sobre ellos seguía descomponiéndose en todos los colores, y los del vidrio o el líquido eran solo los más vivos en el espectro.» A continuación, el texto describe el célebre experimento que llevó a cabo en Benediktbeuern y que le permitió determinar con gran detalle varios índices de refracción (*véase el recuadro* «El experimento de las seis lámparas»).

Las medidas de Fraunhofer fueron extraordinariamente precisas. Como índices de refracción para su vidrio *flint* número 23 obtuvo n = 1,626596 para el rojo y n = 1,66968 para el violeta; para su vidrio *crown* número 13, n = 1,524512 para el rojo, n = 1,544684 para el violeta. Semejantes valores coinciden con los actuales hasta el quinto decimal. De la diferencia entre los índices de refracción de los distintos colores se sigue cuál es la dispersión para cada tipo de vidrio: el *flint* genera un espectro más largo que el *crown*, y los colores están desplazados entre sí. En esta diferencia se basa la fabricación de objetivos de telescopio sin aberración cromática.

Sin embargo, el experimento de las seis lámparas ofrecía imágenes muy débiles. Por ello, Fraunhofer intentó fabricar un nuevo aparato: «Uno que sea para la luz solar lo mismo que el recién descrito para la luz de las lámparas. [...] También, para saber si el medio refringente se comporta con la luz solar igual que con la artificial. En este punto, llegué muy pronto a un descubrimiento que convertía en superfluo un aparato así».

En marzo de 1814, con el laboratorio a oscuras, Fraunhofer colocó un prisma de su vidrio *flint* de alta calidad ante el teodolito e hizo que le llegase luz solar que entraba a través de una rendija en el postigo de la ventana, alejada siete metros. Hoy resulta emocionante leer la sencilla descripción de su hallazgo. En las 49 páginas del texto que citamos aquí, sus investigaciones de hace doscientos años cobran vida: «Primero me dispuse a ver si los espectros formados por la luz solar consistían en una banda luminosa similar a la que se crea con la luz de las lámparas; en vez de eso, observé [...] un número casi incontable de líneas verticales intensas y débiles que no eran brillantes, sino más oscuras que el resto del espectro, y de las cuales algunas parecían casi negras del todo». Más adelante, señaló: «Tras muchos experimentos y modificaciones, me he convencido de que esas líneas y bandas pertenecen a la naturaleza de la luz solar, y que no se originan por la difracción, la ilusión u otro fenómeno».

A partir de lo que había visto, Fraunhofer preparó un grabado en el que marcó con letras mayúsculas las líneas oscuras más intensas, comenzando por la *A* en el rojo hasta la *I* en el extremo violeta del espectro, y con minúsculas las más débiles. «En *A* se reconoce bien una línea nítidamente delimitada y, sin embargo, no es ahí donde se encuentra la frontera del color rojo, que claramente sigue más allá. [...] La línea *C* es de una intensidad considerable y, como *B*, muy negra. [...] Solo en el espacio entre *B* y *H* pueden contarse unas 574 líneas; de ellas, en el dibujo solo he podido indicar las más intensas», escribió.

Diez años antes, en Inglaterra, William Wollaston había percibido con ayuda de una rendija, un prisma y a simple vista siete líneas oscuras en el espectro solar, pero no prosiguió con el estudio del fenómeno. Fraunhofer desconocía tales investigaciones, por lo que, tras su exhaustivo estudio de 1814, las líneas oscuras en el espectro solar quedarían para siempre asociadas a su nombre. También advirtió que la brillante línea amarilla *R* de su lámpara de ajuste en el experimento de las seis lámparas se encontraba justamente en el lugar de la línea *D* oscura (una línea doble estrecha) del espectro solar. Más tarde, esta observación llevó a Kirchhoff y a Bunsen a la explicación correcta del fenómeno.

Gracias al descubrimiento de las líneas oscuras, Fraunhofer creó una espléndida herramienta con la que podía determinar, para todos los colores marcados por las líneas, la dispersión de los diferentes tipos de vidrio. Su taller de Benediktbeuern estaba ahora en condiciones de calcular con exactitud la composición de los objetivos de telescopio acromáticos e, incluso, influir en la fabricación de nuevos tipos de vidrio mediante cambios en los materiales de fundición.

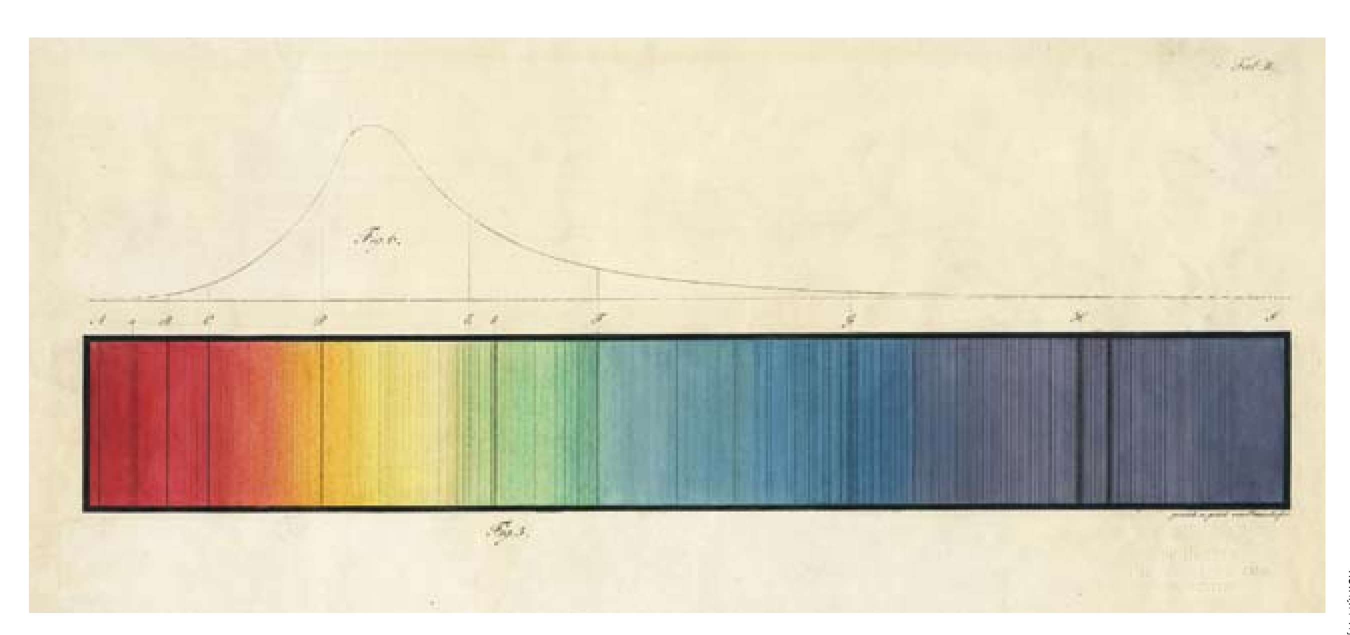
Pero ¿para qué colores debían corregirse los objetivos de los telescopios? Dado que entonces solo se observaba con el ojo, lo natural era centrarse en los más visibles. Eso llevó a Fraunhofer a determinar la sensibilidad espectral del ojo humano, lo que supuso su iniciación a la óptica fisiológica. A tal fin construyó un fotómetro sencillo, con una pequeña lámpara de aceite como fuente luminosa de comparación dirigida hacia el campo visual de su espectrómetro solar. La lámpara podía desplazarse, lo que permitía determinar su brillo relativo a partir de la ley del cuadrado de la distancia. La sensibilidad del ojo, determinada de esta manera, quedó registrada en la parte superior de su famoso grabado del espectro solar. Sus experimentos también le hicieron percatarse de que el ojo no era acromático, ya que podía medirse la diferencia entre las longitudes de convergencia de los rayos azules y los rojos. Al respecto, escribió: «Está claro que, al diseñar un objetivo acromático, merece la pena prestar atención a la dispersión cromática del ojo y anular esa desviación por medio del objetivo».

ARTESANO Y CIENTÍFICO

Si bien, en su calidad de óptico, el descubrimiento de las líneas oscuras reportó a Fraunhofer importantes ventajas comerciales, el científico que también había en él se interesó por la naturaleza de las líneas. Con un prisma y un telescopio de teodolito de una pulgada investigó Venus. Pese a la modesta intensidad de su luz, encontró lo siguiente: «He visto perfectamente delimitadas las líneas *D*, *E*, *b* y *F*. [...] La medición de los segmentos *DE* y *EF* me ha convencido de que la luz de Venus es, en ese respecto, de la misma naturaleza que la solar».

Con el mismo dispositivo estudió algunas estrellas fijas de primera magnitud. «[Su luz] es muchas veces más débil que la de Venus, [...] por lo que también su espectro es mucho menos brillante. Pese a ello, he percibido en el espectro de la luz de Sirio, sin equivocación posible, tres bandas anchas que no parecen encontrar semejanza alguna en la luz del Sol. Una de ellas está en el verde; dos, en el azul. También en el espectro de otras estrellas fijas de primera magnitud se reconocen bandas; sin embargo, estas estrellas, por lo que se refiere a esas líneas, aparentan ser distintas entre sí.» En Sirio, Fraunhofer fue el primero en ver las intensas líneas de absorción del hidrógeno, características de estas estrellas de tipo A con temperaturas de 10.000 grados Kelvin.

Fraunhofer construyó acto seguido un telescopio de cuatro pulgadas con un prisma en el objetivo —se le considera el inventor de este sistema—, con el cual observó los espectros de la Luna, Marte, Cástor, Pólux, Capella y Betelgeuse, primero en Benediktbeuern y luego en el Observatorio Astronómico de Múnich, en Bogenhausen. La descripción de estos espectros y la comparación con el del Sol hacen de Fraunhofer un precursor de la espectroscopia estelar. Con toda razón, intuía que el perfeccionamiento de sus análisis conduciría a descubrimientos de mucho mayor alcance. Pero, como director del instituto, debía poner sus intereses comerciales por encima de lo demás. Su memoria concluía del siguiente modo: «En mis experimentos solo he podido, por falta de tiempo, tomar en consideración lo que aparentase ser de relevancia para la óptica, y lo demás, o



MUSEO ALEMÁN, MÚNICH

LÍNEAS OSCURAS EN EL SOL: El grabado original de Fraunhofer con la descomposición de la luz del Sol medía 40 centímetros de largo. De las 574 líneas oscuras observadas, representó unas 360 y denotó las más intensas con letras mayúsculas. La curva superior muestra el brillo aparente de los colores determinado a partir de la sensibilidad del ojo humano.

Óptica en la abadía de Benediktbeuern

Visitar los lugares en los que trabajó uno de los grandes investigadores de la historia nos permite acercarnos a su tiempo, su obra y su personalidad. Hoy sabemos que Fraunhofer llevó a cabo sus experimentos en el monasterio de la localidad bávara de Benediktbeuern. En su descripción del montaje de las seis lámparas, Fraunhofer apuntó que la distancia entre estas y el telescopio ascendía a 692 pies, pero no especificó en qué lugares concretos del vasto recinto se instalaron los aparatos.

La abundante bibliografía sobre Fraunhofer es parca en indicaciones al respecto. En su libro *Joseph von Fraunhofer y la fábrica de vidrio de Benediktbeuern*, publicado en 1978, Hans Jebsen-Marwedel propone una línea de observación de 225 metros que se extendería desde una buhardilla en el ala oeste del pabellón real, en la que se habría instalado el telescopio, hasta el taller de mecanizado del vidrio, donde se habrían situado las lámparas (*línea discontinua en la ilustración*). La cifra de 225 metros parece, por tanto, suponer que los 692 pies se referían a «pies franceses», de 0,3248 metros, una hipótesis acorde con el hecho de que Fraunhofer empleaba pulgadas francesas en sus aparatos ópticos de precisión.

El monasterio, bien conservado, permite seguir las huellas de Fraunhofer incluso hoy. Bajo la premisa de que sus 692 pies eran en realidad «pies bávaros», de 0,2918 metros (una unidad obligatoria por entonces en Baviera), el autor de este artículo buscó un tramo adecuado en el recinto del monasterio. Con ayuda de Leo Weber, historiador del arte, y Michael Gerg, de la Compañía Bávara de Tiradores de Montaña de Benediktbeuern-Ried, logró identificar una distancia de 202 metros entre dos lugares muy convincentes: la única ventana del laboratorio de óptica de Fraunhofer, un lugar cómodo para instalar su teodolito, y la fachada del taller de mecanizado del vidrio, ante cuya ventana habría situado las seis lámparas. Entre ambos puntos, emplazados a la misma altura, existe una buena conexión visual (*línea continua*).



EL LABORATORIO de Fraunhofer se encontraba en el ala sur del monasterio de Benediktbeuern, en una sala que hoy sirve como capilla. Las observaciones del experimento de las seis lámparas se habrían realizado a través de la ventana del recinto, a la derecha del órgano.



¿DESDE DÓNDE efectuó Fraunhofer el experimento de las seis lámparas? Sabemos que estas se encontraban en el taller de mecanizado de la fábrica de vidrio de la abadía de Benediktbeuern. Sin embargo, aunque en la bibliografía suele leerse que Fraunhofer dispuso su telescopio en una buhardilla en el ala oeste del monasterio (*línea punteada*), a una distancia de 225 metros, las investigaciones del autor sugieren que lo más probable es que las mediciones se efectuasen desde su laboratorio (*línea continua*).

CORTESÍA DEL AUTOR

Este lugar resulta convincente también por otras razones. Fraunhofer probó con numerosos materiales ópticos para su experimento, pero no parece probable que lo hiciera en su pequeña buhardilla, demasiado alta y alejada, sino en su laboratorio. Para las observaciones que le permitieron descubrir las líneas oscuras del espectro, sus notas indican una distancia de 24 pies entre la rendija de la ventana y su espectrómetro. Eso equivale a siete metros, lo que coincide con la amplitud útil de su laboratorio. En la angosta buhardilla no habría podido conseguir esa separación.

El laboratorio óptico de Fraunhofer se encontraba en la que fuera la sala de celebraciones del monasterio, en la primera planta del ala sur del pabellón real. Un lugar suntuosamente decorado en el que destacaban las pinturas de Johann Baptist Zimmermann, artista de la corte muniquesa, cuya obra adornaba el techo. Unida al laboratorio por el oeste se encontraba la espaciosa vivienda de Fraunhofer. Una escalera conducía directamente desde la cocina hasta los talleres de la planta baja. Hoy, el antiguo laboratorio sirve como capilla a la orden salesiana de Don Bosco.

no tocarlo en absoluto o no proseguir con ello. Puesto que parece que el camino aquí desbrozado por medio de experimentos físico-ópticos lleva a resultados interesantes, sería muy deseable que investigadores competentes de la naturaleza tuviesen a bien prestarle atención».

Mientras tanto, las múltiples empresas de Utzschneider habían comenzado a sufrir dificultades económicas, las cuales también afectaban a su instituto de óptica y a las labores de Fraunhofer en Benediktbeuern. En 1818, el monasterio se vendió al Estado bávaro y Fraunhofer hubo de trasladarse con algunos colaboradores a Múnich. Solo la fundición para la obtención de vidrios de calidad óptica pudo seguir funcionando en el lugar original. En los años siguientes, ello obligó a Fraunhofer a efectuar frecuentes viajes entre Múnich y Benediktbeuern. Quería estar presente en cada fundición y supervisar hasta las pequeñas pruebas con nuevos materiales. En Múnich se fabricarían en el decenio siguiente grandes aparatos de medida y varios telescopios; el más conocido seguramente fuese el gran refractor de nueve pulgadas para Wilhelm Struve en la Universidad de Tartu.

Al mismo tiempo, Fraunhofer intentó entablar relaciones más estrechas con la Real Academia de Múnich. Quería participar en sus sesiones, pero para ello tenía que pasar de miembro correspondiente (lo era desde 1817) a miembro ordinario o extraordinario. Al principio, los integrantes de la sección físico-matemática se resistieron: arguyeron que Fraunhofer carecía de formación académica, que sus trabajos no eran importantes y que quizá ni siquiera los hubiese escrito él mismo. Se le acusó de no dar a conocer su procedimiento para la obtención de vidrios sin franjas, aunque siempre hacía públicos sus conocimientos científicos sobre óptica. Tras largas discusiones, el secretario de la sección, un botánico, convenció a la mayoría de los miembros de que accedieran a su solicitud de admisión, pues también las célebres Academias de Londres y París habían aceptado miembros sin estudios. En 1821, la Academia de Múnich incorporó a Fraunhofer como miembro extraordinario.

Unas semanas después pudo avergonzar a sus detractores con su nueva publicación científica: «Nueva modificación de la luz mediante influjos recíprocos y difracción de los rayos, y las leyes de estos». Tras el hermético título se escondían tres conceptos hoy comunes en óptica: difracción, red de difracción e interferencia. Con instrumentos y experimentos astutamente concebidos, Fraunhofer aportó pruebas convincentes de la naturaleza ondulatoria de la luz. De ello hablaremos en la segunda parte de este artículo.

PARA SABER MÁS

Joseph von Fraunhofer: Handwerker, Forscher, Akademiemitglied. G. D. Roth. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft; Stuttgart, 1976.

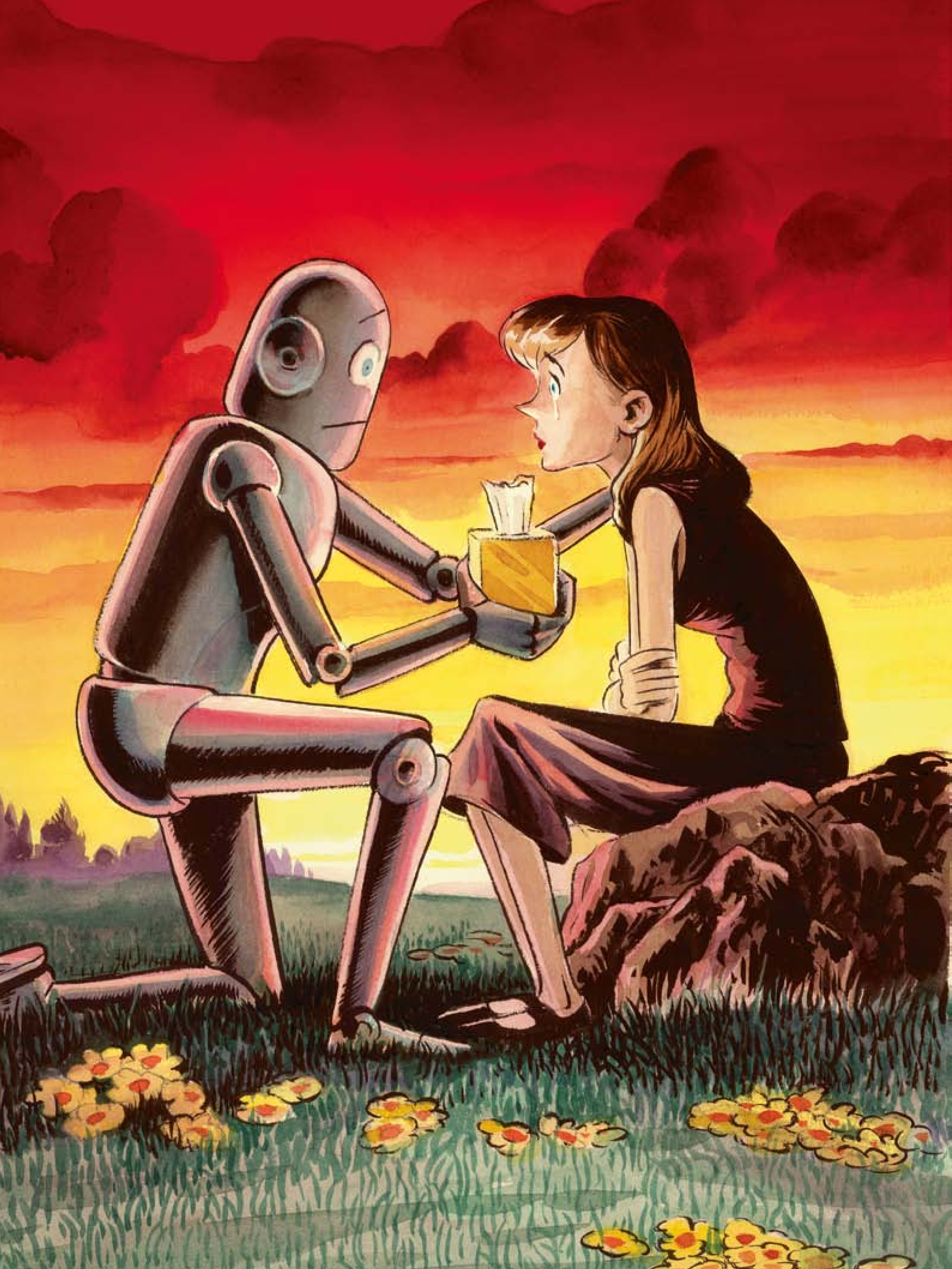
Joseph von Fraunhofer und die Glashütte in Benediktbeuern. H. Jebsen-Marwedel. Publicado por la Sociedad Fraunhofer; Múnich, 1978.

Die Pioniere der Sternspektroskopie. R. Häfner y R. Riekher en *Beiträge zur Astronomiegeschichte*, vol. 6, págs. 137-165; dirigido por W. R. Dick y J. Hamel. Harri Deutsch; Fráncfort, 2003.

Joseph von Utzschneider und Joseph von Fraunhofer im ehemaligen Benediktinerkloster Benediktbeuern: 1805-1818. L. Weber en *Fraunhofer in Benediktbeuern: Glashütte und Werkstatt*. Publicado por la Sociedad Fraunhofer; Múnich, 2008.

EN NUESTRO ARCHIVO

La carrera por el mayor refractor del mundo. Wolfgang Steinicke y Stefan Binnewies en *IyC*, enero de 2013.



TECNOLOGÍA

ROBOTS EMPÁTICOS

Antes de que podamos compartir nuestras vidas con máquinas, debemos enseñarlas a comprender e imitar las emociones humanas

Pascale Fung

«Lo siento, no le he oído».

Estas fueron tal vez las primeras palabras empáticas de una máquina comercial. A finales de los años noventa, la empresa de Boston SpeechWorks International comenzó a suministrar un *software* de atención al cliente programado para usar esta y otras frases semejantes. Durante el tiempo transcurrido desde entonces, nos hemos acostumbrado a hablar con máquinas. Casi todas las llamadas a una línea de atención al cliente comienzan con una conversación con un robot. Cientos de millones de personas llevan un asistente personal inteligente en su bolsillo. Podemos pedir a Siri y a otros asistentes análogos que encuentren un restaurante, llamen a nuestros amigos o busquen una canción y la reproduzcan. Tienen la capacidad de simular una conducta inquietantemente humana. (Humano: «Siri, ¿me quieres?» Siri: «No soy capaz de amar».)

Pero las máquinas no siempre responden como nos gustaría que lo hiciesen. El programa de reconocimiento del habla comete errores. Las máquinas no suelen comprender las intenciones. No captan ni emoción, ni humor, ni sarcasmo, ni ironía. Si en el futuro vamos a emplear más tiempo interaccionando con ellas, sean aspiradoras inteligentes o enfermeras robóticas humanoides, necesitaremos que hagan algo más que entender nuestras palabras: nos tendrán que interpretar. Dicho de otro modo, necesitaremos que nos «comprendan» y compartan nuestras emociones. Que posean empatía.

EN SÍNTESIS

Cuando nos relacionemos más con máquinas controladas por voz y gestos, confiaremos en que reconozcan nuestras emociones y comprendan rasgos complejos de la comunicación, como el humor, el sarcasmo y la intención.

Para hacer posible tal comunicación, tenemos que dotar a las máquinas con un módulo de empatía, esto es, un *software* que extraiga señales emocionales del habla y la conducta humanas y dirija una respuesta acorde en un robot.

Las investigaciones sobre robots empáticos están en sus comienzos, pero los científicos ya usan técnicas de tratamiento de señales, algoritmos de aprendizaje automático y herramientas de análisis de sentimientos para crear robots virtuales que puedan «comprender» las emociones humanas.

ZOHAR LAZAR

En mi laboratorio de la Universidad de Ciencia y Tecnología de Hong Kong estamos desarrollando ese tipo de máquinas. Los robots empáticos pueden ofrecer una gran ayuda a la sociedad. No funcionarán como simples asistentes; serán compañeros. Resultarán amistosos y amables, y se anticiparán a nuestras necesidades físicas y emocionales. Aprenderán de sus interacciones con los humanos. Mejorarán nuestra vida y harán más eficiente nuestro trabajo. Se disculparán por sus errores y pedirán permiso antes de actuar. Cuidarán de las personas mayores y enseñarán a nuestros hijos. Podrían incluso salvar nuestra vida en situaciones críticas sacrificándose ellos mismos en esa acción, lo que representaría un acto de suprema empatía.

Ya existen en el mercado algunos robots que imitan las emociones. Uno de ellos es Pepper, un pequeño humanoide construido por la empresa francesa Aldebaran Robotics para la compañía japonesa Softbank Mobile; y Jibo es un robot asistente personal de sobremesa de tres kilogramos diseñado por un grupo de ingenieros, entre ellos Roberto Pieraccini, antiguo director de técnicas de diálogo en SpeechWorks. El campo de la robótica empática se halla aún en sus inicios, pero van surgiendo herramientas y algoritmos que mejorarán sumamente estas máquinas.

Pascale Fung es profesora de ingeniería informática y electrónica en la Universidad de Ciencia y Tecnología de Hong Kong. Fue elegida miembro del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos y de la Asociación Internacional de Comunicación Oral por sus contribuciones a las interacciones entre máquinas y humanos.



EL MÓDULO DE EMPATÍA

Comencé a pensar en crear un robot empático hace seis años, cuando mi grupo diseñó el primer equivalente chino de Siri. Me fascinaba la naturalidad con la que los usuarios reaccionaban emocionalmente hacia los sistemas de asistencia personal, y la frustración que sentían cuando estos no comprendían lo que estaban intentando comunicarles. Me di cuenta de que la clave para construir máquinas que entendieran las emociones era crear algoritmos de reconocimiento del habla como los que había estado desarrollando durante mis 25 años de carrera profesional.

El núcleo de cualquier máquina inteligente es un sistema de *software* formado por módulos, cada uno de los cuales corresponde a un programa que realiza una única tarea. Un robot inteligente podría constar de un módulo para el tratamiento del habla humana, otro para reconocer objetos en imágenes captadas por su cámara de vídeo, y así sucesivamente. Un robot empático tiene «corazón», esto es, un fragmento de *software* llamado módulo de empatía. Este analiza señales faciales, indicadores acústicos en el habla y el contenido de esta para descifrar las emociones humanas e indicar al robot cómo debe responder.

Cuando dos personas se comunican entre sí, usan de forma automática diversas señales para comprender el estado emocional del otro. Interpretan los gestos faciales y el lenguaje corporal, perciben cambios en el tono de voz y comprenden el contenido del lenguaje oral. La elaboración de un módulo de empatía consiste en identificar características de la comunicación humana que puedan usar las máquinas para reconocer las emociones y, a continuación, entrenar a los algoritmos para que las detecten.

Cuando mi equipo se dispuso a enseñar a las máquinas a reconocer emociones en el lenguaje oral, además del significado de las propias palabras, decidió entrenarlas para que identificaran rasgos acústicos fundamentales del habla, porque así es como actúan los humanos. Casi nunca pensamos sobre ello en estos términos, pero la comunicación humana se basa en un procesamiento de señal. Nuestro cerebro detecta la emoción en la voz de una persona prestando atención a señales acústicas que indican estrés, alegría, miedo, enfado, repugnancia y otras emociones. Cuando estamos alegres, hablamos con mayor rapidez y se eleva el tono de nuestra voz. Si estamos estresados, nuestra voz se vuelve apagada y seca. Los ordenadores pueden detectar estas señales mediante técnicas de tratamiento de señal, al igual que un polígrafo capta la presión arterial, el pulso y la conductividad de la piel. Para identificar el estrés, utilizamos un aprendizaje supervisado para entrenar a los algoritmos de aprendizaje automático en el reconocimiento de señales sonoras que se correlacionaran con el estrés.

Aunque una breve grabación de habla humana contenga solo algunas palabras, de ella puede extraerse una enorme cantidad de datos para tratamiento de señal procedente del tono de voz. Comenzamos por enseñar a las máquinas a reconocer el estrés negativo (angustia) en muestras de habla correspondientes a estudiantes de mi institución, a la que ellos han apodado «Universidad de Estrés y Tensión de Hong Kong». Elaboramos el primer corpus multilingüe de la emoción natural de estrés en inglés, mandarín y cantonés al plantear a los estudiantes doce preguntas con un grado de estrés cada vez mayor. Cuando habíamos recopilado unas diez horas de datos, nuestros algoritmos podían reconocer el estrés con una precisión del 70 por ciento, lo que resultó notablemente similar a una audición humana.

Mientras realizábamos esa tarea, otros miembros de mi grupo entrenaron a máquinas en el reconocimiento del estado de ánimo en piezas musicales mediante el análisis de las características del sonido solamente (es decir, sin prestar atención a la letra). El estado de ánimo, a diferencia de las emociones, es una cualidad que permanece a lo largo de toda la pieza de música que se interpreta. Mis colaboradores comenzaron recogiendo 5000 piezas musicales de todos los géneros en las principales lenguas europeas y asiáticas. Unos musicólogos ya habían clasificado algunos centenares de esas piezas en 14 categorías de estados de ánimo.

Extrajimos electrónicamente unos mil atributos fundamentales de señal en cada canción (parámetros acústicos como energía, frecuencia fundamental, armónicos). A continuación, usamos la música catalogada para entrenar a catorce «clasificadores» de *software*. Cada uno era responsable de determinar la pertenencia de una pieza musical a un estado de ánimo concreto. Por ejemplo, un clasificador escucha solo música alegre y otro solo melancólica. Los catorce trabajan en conjunto, basándose en las suposiciones de los otros. Si un clasificador «alegre» determina por error que una canción melancólica es alegre, en el siguiente turno de reaprendizaje se volverá a entrenar a este clasificador. En cada turno, se somete al clasificador más débil a un nuevo entrenamiento, y se mejora así el sistema global. De esta forma, la máquina escucha muchas piezas musicales y aprende qué estado de ánimo le corresponde a cada una. A su vez, puede adivinar el de cualquier otra canción simplemente escuchando la melodía musical, como hacemos la mayoría de nosotros. Basándonos en estas investigaciones, junto con antiguos estudiantes fundamos la empresa Ivo Technologies para construir máquinas empáticas de uso doméstico. El primer producto, Moodbox, será un centro doméstico inteligente de información y entretenimiento que controla la música y la iluminación de cada habitación y responde a las emociones del usuario.

ENTENDER LA INTENCIÓN

Para captar el humor, el sarcasmo, la ironía y otros atributos de comunicación de alto nivel, una máquina tendrá que hacer algo más que reconocer las emociones a partir de características acústicas. También necesitará comprender el significado subyacente del habla y contrastarlo con la emoción con la que se ha emitido.

El reconocimiento avanzado del habla a partir de datos obtenidos en humanos viene desarrollándose desde los años ochenta. Aunque hoy la técnica está bastante adelantada, existe una gran diferencia entre la transcripción del habla y su comprensión.

Pensemos en la serie de sucesos cognitivos, neurológicos y musculares que tiene lugar en un diálogo. Una persona elabora sus pensamientos, escoge sus palabras y habla, tras lo cual el oyente descodifica el mensaje. La cadena de comunicación entre máquina y humanos sucede así: las ondas del habla se convierten en forma digital y después en parámetros; el programa de reconocimiento del habla los transforma en palabras y un descodificador semántico asigna a estas un significado.

Cuando comenzamos nuestro estudio sobre robots empáticos, nos dimos cuenta de que algunos algoritmos similares a los que extraen impresiones del usuario a partir de sus comentarios en Internet nos podrían ayudar a analizar las emociones en el habla. Estos algoritmos de aprendizaje automático buscan señales expresivas en el contenido. Palabras fundamentales como «pena» y «miedo» sugieren soledad. El uso repetido de vocablos coloquiales expresivos (como «vaya») puede indicar que el mensaje es enérgico. También analizamos información sobre el estilo del habla. ¿Son las respuestas de una persona claras y seguras, o son dubitativas, salpicadas con pausas y palabras evasivas? ¿Son elaboradas y detalladas, o cortas y secas?

En nuestro estudio sobre el reconocimiento del estado de ánimo en la música, hemos entrenado a los algoritmos a buscar señales emocionales en letras de canciones. En lugar de extraer patrones de audio de cada pieza, extrajimos cadenas de palabras de su letra y se las presentamos a distintos clasificadores. Cada uno se encargaba de determinar si tales cadenas, denominadas *n*-gramas, transmitían alguno de los 14 estados de ánimo. Además de las cadenas de palabras, usamos también etiquetados gramaticales de esos vocablos, como parte característica de la letra de la canción, para clasificar el estado de ánimo. Los ordenadores pueden usar *n*-gramas y etiquetados gramaticales para establecer aproximaciones estadísticas de reglas gramaticales en cualquier lengua. Estas reglas ayudan a programas como Siri en el reconocimiento del habla y a *software* como Google Translate en la traducción de un texto a otra lengua.

Una vez que una máquina logra comprender el contenido del lenguaje oral, puede comparar ese contenido con la forma en que se transmite. Si una persona suspira y dice «Estoy tan contento de tener que trabajar todo el fin de semana», un algoritmo puede detectar la diferencia entre las señales emocionales y el contenido de la frase y calcular la probabilidad de que el orador esté siendo sarcástico. De forma similar, una máquina que puede comprender la emoción y el contenido del habla puede relacionar esa información con otras aportaciones para identificar intenciones más complejas. Si alguien dice «Tengo hambre», un robot puede determinar cuál es la mejor respuesta basándose en su ubicación, hora del día y preferencias históricas de su usuario, junto con otros parámetros. Si el robot y su usuario están en casa y es casi la hora de comer, el primero podría responder: «¿Te gustaría que te preparase un bocadillo?». Si ambos están de viaje, la máquina podría proponer: «¿Te gustaría que buscase un restaurante?».

ZARA, LA *SUPERGIRL*

A principios del año pasado, estudiantes e investigadores posdoctorales de mi laboratorio comenzaron a integrar nuestros módulos de reconocimiento de habla y emociones en un prototipo de máquina empática a la que bautizamos Zara la *Supergirl*. Su entrenamiento costó cientos de horas de datos, pero actualmente el programa se ejecuta en un simple ordenador de sobremesa. Por el momento es un robot virtual, representado en la pantalla por un personaje de dibujos animados.

Cuando se inicia una conversación con Zara, ella dice: «Por favor, espere mientras analizo su cara». Los algoritmos estudian las imágenes captadas por la cámara del ordenador para determinar género y raza de su interlocutor. Seguidamente, adivinará cuál es el idioma que habla (Zara habla inglés y mandarín y está aprendiendo francés) y le formulará algunas preguntas en dicha lengua. «¿Cuál es su primer recuerdo?» «Cuénteme algo sobre su madre.» «¿Cómo fueron sus últimas vacaciones?» «Cuénteme una historia con una mujer, un perro y un árbol.» A través de este proceso y basándose en sus expresiones faciales, las características acústicas de su voz y el contenido de sus respuestas, Zara contestará de un modo que imitará la empatía. Al cabo de cinco minutos de conversación, intentará adivinar su personalidad y le preguntará sobre sus opiniones hacia las máquinas empáticas. Esta es nuestra forma de obtener información de las personas cuando interaccionan con los primeros robots empáticos.

Zara es un prototipo, pero se volverá más inteligente y más empática a medida que interaccione con más gente y recoja más datos, ya que se basa en algoritmos de aprendizaje automático. Actualmente su base de datos de conocimiento se basa solo en interacciones con los estudiantes de posgrado en mi laboratorio. Para este año planeamos dotar a Zara de un cuerpo instalándola en un robot humanoide.

Sería prematuro afirmar que ha llegado la era de los robots amigables. Estamos solo comenzando a desarrollar las herramientas más básicas que necesitarían los robots emocionalmente inteligentes. Cuando los descendientes de Zara comiencen a llegar al mercado, no deberíamos esperar que sean perfectos. De hecho, he llegado a la conclusión de que el objetivo no consiste en crear máquinas perfectamente exactas y eficientes. Lo importante es que nuestras máquinas se vuelvan más humanas, aunque tengan defectos. Después de todo, así es como actuamos los humanos. Si lo hacemos bien, las máquinas empáticas no serán los robots dominantes que suscitan temor en algunas personas. Se convertirán en nuestros cuidadores, nuestros profesores y nuestros amigos.

PARA SABER MÁS

A multilingual database of natural stress emotion. Xin Zuo, Tian Li y Pascale Fung. Presentado en la Octava Conferencia Internacional sobre Evaluación y Recursos del Lenguaje (LREC 2012), Estambul, 21-27 mayo de 2012.

Multimodal music emotion classification using AdaBoost with decision stumps. Dan Su, P. Fung y N. Auguin. Presentado en la Conferencia Internacional sobre Acústica, Habla y Tratamiento de Señal del IEEE en 2013 (ICASSP 2013), Vancouver, 26-31 mayo de 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Mi amigo robot. Miriam Ruhenstroth en *MyC* n.º 45, 2010.

Ética para robots. Michael Anderson y Susan Leigh Anderson en *IyC*, diciembre de 2010.

Dónde están los robots parlantes. Joshua K. Hartshorne en *MyC* n.º 57, 2012.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik



Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.

Anillos de humo

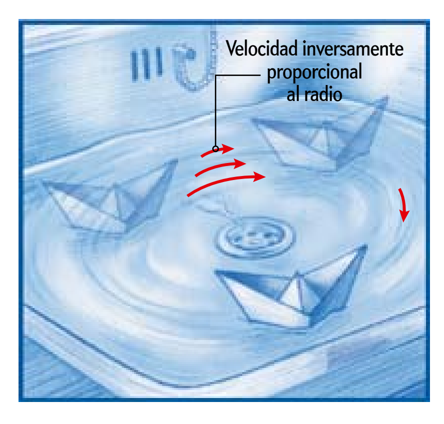
Estas sorprendentes estructuras se forman muy a menudo. ¿Por qué son tan estables?

Un chorro de humo soplado sin más se dispersará con rapidez. En cambio, un anillo de humo puede recorrer una buena distancia sin deformarse demasiado. Este tipo de flujos son habituales en líquidos y gases: aparecen en los ventiladeros de los volcanes, los pulpos los crean cuando expulsan agua para impulsarse y, a cada latido del corazón, la sangre que penetra en el ventrículo izquierdo forma un remolino anular. ¿Cómo se forman estas estructuras y a que se debe su estabilidad?

Los anillos de humo forman parte de una categoría de flujos llamados vórtices. Estos se caracterizan por la presencia de un «filamento» central de fluido, el cual rota con gran rapidez y se encuentra rodeado por un remolino. El más simple es el remolino recto, como el que vemos en un tornado o el que se forma en nuestra bañera cuando se vacía. En ellos, la velocidad del fluido aumenta conforme nos acercamos al centro. En concreto, es inversamente proporcional a la distancia al eje.

Dicha relación se encuentra ligada a una propiedad importante: un pequeño objeto alejado del núcleo del remolino se verá arrastrado por el fluido en una trayectoria circular, pero sin rotar sobre sí mismo. Conservará su orientación, al contrario de lo que ocurre con el movimiento «en bloque» que experimenta la barquilla de un tiovivo. La rotación del fluido sobre sí mismo solo se da en el núcleo del remolino.

Esta propiedad se debe a que resulta difícil cambiar el estado de rotación de un fluido. Una vez que hemos removido el té o el café de nuestra taza, el líquido ejecutará un gran número de vueltas antes de detenerse. Este comportamiento aparece porque se trata de fluidos muy poco viscosos, y es la viscosidad (o el rozamiento) lo que permite poner un objeto en rotación o frenarlo. Para hacer girar un tornillo o una peonza, habremos de aplicar con los dedos dos fuerzas de la misma intensidad y sentidos opuestos. En ausencia de rozamiento es imposible generar una rotación, como podremos comprobar si intentamos desenroscar un tornillo con una mano grasienta.



EN UN REMOLINO, solo muy cerca del eje central tiene lugar una rotación del líquido sobre sí mismo. Lejos de esa zona, el líquido ejecuta un movimiento circular pero sin rotación intrínseca, por lo que un barco de papel mantendrá la misma orientación a lo largo de la trayectoria circular.

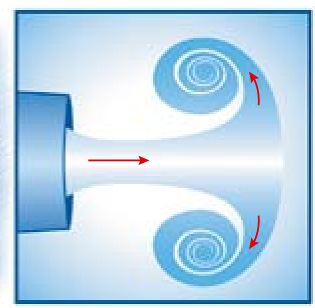
En un fluido, la viscosidad caracteriza la intensidad de las fuerzas de rozamiento interno allí donde se encuentra en contacto con un sólido. Sin viscosidad, por mucho que tratemos de «cizallar» las capas de fluido (como el tornillo con nuestros dedos) no actuaremos sobre su estado de rotación.

Ya entendemos mejor la estructura de un vórtice. Una vez puesto a rotar el núcleo, este no puede cambiar el estado de rotación del fluido que lo rodea. Esa condición perdura y, en el transcurso de su desplazamiento, el núcleo sigue estando constituido por las mismas partículas. Conservará su integridad, tal y como ocurre con los anillos de humo, en los que las partículas de hollín permanecen confinadas en el anillo.

Anillos en movimiento

Hemos indicado que la velocidad del fluido aumenta conforme nos acercamos al núcleo del remolino. Sin embargo, la presión decrece. En un tornado, esa diferencia de presión puede alcanzar un buen





CAÑÓN DE ANILLOS DE HUMO: Para fabricar uno, lo primero que hemos de hacer es llenar de humo su interior. Después, si una persona tensa la membrana elástica montada en la parte posterior y la suelta de golpe, impulsará el humo hacia la boca del cañón. Eso generará un remolino en forma de anillo (*la imagen derecha muestra una sección*) que, después, se desprenderá y avanzará a velocidad constante antes de perder su forma.

BRUNO VACARO (*ilustraciones*)

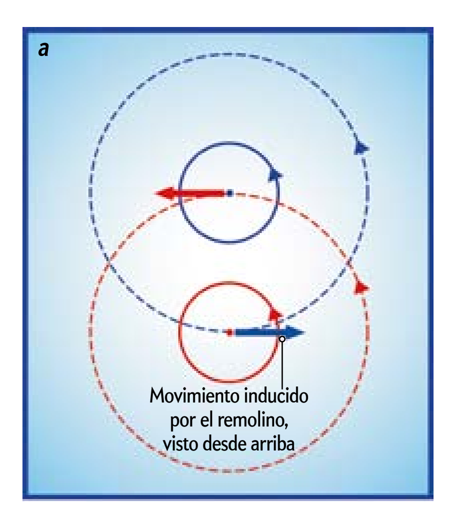
porcentaje de la presión atmosférica, lo suficiente para arrastrar un automóvil. A una escala más modesta, cuando vaciamos el fregadero y se forma un remolino, los pequeños restos sólidos presentes en el agua se ven arrastrados hacia el desagüe antes incluso de que se escurra todo el líquido. Los delfines aprovechan el mismo fenómeno para insuflar aire en los vórtices anulares de agua que crean con la cola y obtener hermosas burbujas con forma de anillo, con las que después juegan.

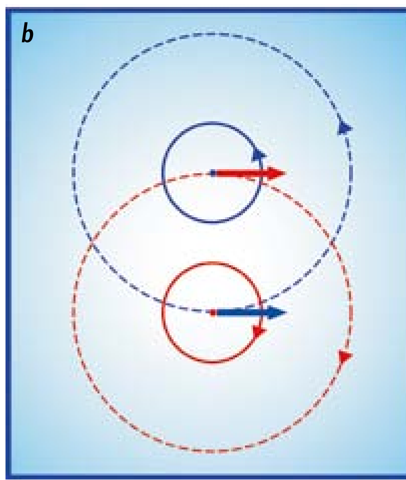
Es posible demostrar matemáticamente que la conservación del estado de rotación en un vórtice implica que su núcleo filamentoso no puede terminar en el seno del fluido. Por tanto, o bien su extremo se apoya en una superficie sólida (como sucede en un tornado), o bien el núcleo describirá una curva cerrada. Un anillo de humo cumple esta última condición.





LOS DELFINES juegan creando burbujas con forma de anillo. Para conseguirlo, el animal forma primero con la cola un vórtice anular de agua (*izquierda*). Luego insufla aire en la proximidad del remolino (*centro*), el cual se ve atraído debido a la diferencia de presión reinante en el vórtice. Como resultado, se forma una burbuja anular de aire en el seno del agua (*derecha*).





REMOLINOS ACOPLADOS: Dos remolinos paralelos ejercen fuerzas opuestas uno sobre otro, por lo que girarán alrededor del centro del eje que los une (*a*). En el caso de dos remolinos antiparalelos, el resultado será un desplazamiento en bloque de ambos (*b*).

Como todos sabemos, un anillo de humo avanza a velocidad constante en la dirección de su eje. ¿A qué se debe este desplazamiento? Para entenderlo, imaginemos primero dos remolinos idénticos, paralelos y cercanos entre sí. El primero imprimirá un movimiento circular al fluido circundante, por lo que arrastrará al segundo, y viceversa. Si ambos giran en el mismo sentido, las velocidades que cada uno de ellos induce en el otro serán opuestas. Como resultado, los dos remolinos girarán en torno al centro del segmento que los une, sin alejarse uno del otro y describiendo círculos.

En cambio, si los dos remolinos giran en sentidos contrarios, cada uno inducirá en el otro la misma velocidad, perpendicular a la recta que los une, por lo que la pareja quedará animada de un movimiento de traslación en bloque. Lo mismo ocurre en un vórtice anular: cada parte del anillo se ve arrastrada por el movimiento asociado al resto del remolino; en particular, por la porción diametralmente opuesta, la cual gira en sentido contrario.

Dicho arrastre tiene lugar en la dirección perpendicular al plano del anillo y en el mismo sentido que el adoptado por el movimiento del fluido a través del disco que define el anillo. Fuera de este, el fluido no se cizalla, o lo hace muy poco, por lo que no aparecen las fuerzas de rozamiento que, de otro modo, generaría el avance de un objeto de tamaño similar. Gracias a ello, un remolino anular puede recorrer una gran distancia a velocidad constante.

Hágalo usted mismo

Si tan difícil resulta modificar el estado de rotación de un fluido, ¿por qué podemos formar remolinos? Para lograrlo, hay que crear una «singularidad» en el flujo. Tome una gota de tinta o de leche y déjela caer en un vaso de agua. Verá que se forma un anillo que se desplaza hacia abajo. ¿Por qué? Ni en el fluido en movimiento (la gota de tinta o de leche) ni en el que se halla en reposo (el agua del vaso) hay rotación. Sin embargo, en el instante en que el primero penetra en el segundo, en la frontera entre ambos se genera una cizalladura tan intensa que la viscosidad pone a rotar los fluidos.

Otro modo de crear un remolino anular consiste en sumergir en agua un tubo de boca circular que contenga un líquido coloreado, y luego expulsar este con un émbolo. Cuando el líquido comienza a manar, en el borde se forma un remolino en el que el fluido coloreado se enrolla alrededor del fluido ambiente. A medida que el primero abandona el recipiente, el remolino se agranda, el fluido se enrolla más y más sobre sí mismo y el anillo así formado se separa lentamente del orificio. Una vez que la longitud de líquido expulsado sea del orden de cuatro veces el diámetro del orificio, el anillo ya no crecerá más y se desprenderá, avanzará por el fluido ambiente y se alejará del orificio. En efecto: acabamos de crear un magnífico anillo de humo líquido.

PARA SABER MÁS

Hydrodynamique physique. J.-P. Hulin, É. Guyon y L. Petit. CNRS Éditions/EDP Sciences, 3.ª edición, 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

Vórtices anudados en fluidos ideales. Alberto Enciso y Daniel Peralta-Salas en *IyC*, junio de 2015.

por Bartolo Luque



Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.

Symmetry, un film palíndromo

La magia de una historia contada al revés

El profesor Jones había estado trabajando en la teoría del tiempo durante muchos años.

—Y he encontrado la ecuación clave —le dijo a su hija un día—. El tiempo es un campo. Esta máquina que hice puede manipular, inclusive revertir el tiempo.

Oprimiendo un botón al hablar dijo:

—Esto debería hacer que el tiempo camine hacia atrás hacia camine tiempo el que hacer debería esto.

Dijo hablar al botón un oprimiendo:

—Tiempo el revertir inclusive, manipular puede hice que máquina esta. Campo un es tiempo el —día un hija su a dijo le—. Clave ecuación la encontrado he y.

Años muchos durante tiempo del teoría la en trabajando estado había Jones profesor el.

(Frederic Brown, *El fin*. Recopilado en *Pesadillas y geezenstacks*, 1966).

La simetría es una noción fundamental en ciencia y matemáticas. Más aún, probablemente constituya un a priori estético para el ser humano y un concepto cardinal en todas las culturas. Así pues, no es de extrañar que, como en otros muchos ámbitos, la gran divinidad de los ludolingüistas sea la simetría.

La forma más sencilla de simetría en este campo se encuentra representada por los palíndromos, aquellas palabras que se leen igual del derecho que del revés. Algunos ejemplos son *allá*, *anilina*, *reconocer*, *rotor*... Mi favorita es *radar* (acrónimo del inglés *radio detection and ranging*), donde el palíndromo va más allá del mero juego verbal, al sugerir la reflexión de las ondas de radio.

El término *palíndromo* procede de las voces griegas *palin* («otra vez» o «hacia atrás») y *dromos* («carrera»). Como diría el gran enigmista Màrius Serra: «El palíndromo es la joya de la corona ludolingüística». Por supuesto, existen multitud de ejemplos en todas las lenguas. Por citar solo uno, el palíndromo más largo conocido es finés: *saippuakauppias*, aunque pierde su halo mágico cuando nos enteramos de que significa «vendedor de jabón».

En realidad, el término puede aplicarse no solo a letras, sino a cualquier secuencia de símbolos. Así, 2002 fue el último año palíndromo y 2112 será el siguiente. Los números palíndromos se conocen en castellano como capicúas. La palabra procede del catalán *cap i cua*, «cabeza y cola». Comenzó a usarse en el siglo XIX en Barcelona y parece más que probable que proceda de una jugada de dominó, así llamada, en la que la última ficha ganadora podía colocarse en cualquiera de los dos extremos.

Los números capicúas no son la joya de la corona de la matemática recreativa, pero han recibido gran atención por parte de expertos y aficionados. Por ejemplo, la conjetura del algoritmo-196, conocida desde los años treinta del siglo XX, sigue sin estar resuelta.

El algoritmo-196 nos invita a tomar un número natural cualquiera y sumarle su reverso. Consideremos el 56. Al añadirle 65, obtenemos 121. Si el número resultante es capicúa, como ocurre en este caso, hemos acabado. En caso contrario continuamos el proceso. Si, por ejemplo, comenzamos con el 59, al iterar el algoritmo tendremos 59 + 95 = 154, 154 + 451 = 605, 605 + 506 = 1111. Hemos logrado un número palíndromo en el tercer paso. La conjetura del algoritmo-196 afirma que, tras un número finito de iteraciones, acabaremos antes o después en un capicúa.

¿Y lo de 196? Se conocen como números de Lychrel aquellos que no alcanzan un palíndromo a través de la iteración del algoritmo-196. En base 10 no se ha demostrado la existencia de números de Lychrel, pero el 196 es el primer sospechoso. A fecha de hoy, superadas las 1000 millones de iteraciones y alcanzado un número de 300 millones de dígitos, el número 196 sigue sin dar ningún capicúa. Por cierto, el término *Lychrel* fue acuñado por Wade VanLandingham como un cuasianagrama del nombre de su novia, Cheryl —anécdota ludolingüística que me permite retomar el hilo de nuestro discurso.

De la palabra a la narración

Los palíndromos no se limitan a números o palabras. Existen también frases palíndromas. Ejemplos bien conocidos son *Arriba la birra*, *Atrapa y aparta* o *Se es o no se es*. Algunos gozan de fama literaria, como *Atar a la rata* y *Átale, demoníaco Caín, o me delata*, sobre los que bascula el relato *Satarsa*, de Julio Cortázar.

Resulta difícil conseguir frases palíndromas que no suenen artificiales y encorsetadas, si bien hay algunos ejemplos excepcionales, como *Adán no cede con Eva y Yavé no cede con nada*. O el latino *In girum imus nocte et consumimur igni*,

S	A	T	O	R
A	R	E	P	O
T	E	N	E	T
O	P	E	R	A
R	O	T	A	S

EL CUADRADO SATOR, común en muchos monumentos romanos y medievales de Europa, compone un palíndromo que puede leerse de derecha a izquierda y de arriba abajo.

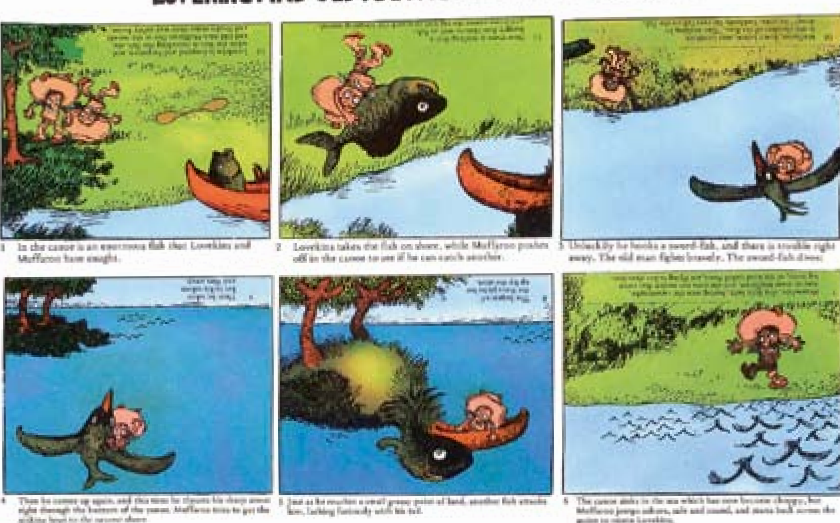
que, en traducción libre, vendría a decir algo así como «vagamos en la noche y nos consumimos en el fuego».

Uno de los palíndromos más notables según los expertos es el llamado cuadrado Sator, que podemos encontrar en numerosos monumentos romanos y medievales de Europa. Se trata de una especie de cuadrado mágico en el que las mismas palabras generan un palíndromo no solo de derecha a izquierda, sino también de arriba abajo, por lo que pueden leerse hasta en cuatro sentidos distintos (*véase la figura de la página anterior*). Algunos han traducido el texto como «Arepo, el sembrador, mantiene con destreza las ruedas».

La creación de frases palíndromas viene de lejos, como muestran los versos retrógrados, o sotádicos, debidos al poeta tracio Sótades de Maronea, a quien se atribuye la invención del género. Sótades, una figura mítica de la ludolingüística, vivió en Alejandría durante el siglo III antes de nuestra era. Crítico con el poder, fue arrojado al fondo del mar Egeo en el interior de un cofre de plomo por orden del rey Ptolomeo II, al que dedicó un poema que, según parece, no fue de su agrado. Más de dos milenios después, sus obras siguen inspirando a poetas como Víctor Jlébnikov, quien en 1920 escribió *Stenka Razin*, un poema de más de 400 versos sotádicos en cirílico. O, más recientemente, al comediante Demetri Martin y su poema palíndromo de 224 palabras *Dammit I'm Mad* (2009).

El ludolingüista Marcos Donnantuoni acuñó los términos palíndromos *ailifilia*, para indicar la pasión por los palíndromos, y *aibofobia*, para lo contrario. La ailifilia sigue latiendo en la literatura, como demuestran, por citar unos pocos ejemplos, el brevísimo relato de ciencia ficción de Frederic Brown que encabeza esta columna, así como *Le grand palindrome* (1969), del miembro de Oulipo Georges Perec, con más de 6000 caracteres, o la novela palíndroma *Dr. Awkward & Olson in Oslo* (1986), de Lawrence Levine, con la espeluznante cifra de 31.594 palabras. Si sufren ailifilia no dejen de buscar consuelo en la web del Club Palindromista Internacional (cpalindromistai.blogspot.com.es). Creado en 1987 por el aficionado Josep M. Albaigès i Olivart, sigue gozando de una salud envidiable.

Los números capicúas son codiciados trofeos de los coleccionistas aficionados a las loterías. Una categoría especial la componen los palíndromos que, además, son reversibles: los que vistos cabeza abajo



A FISH STORY, tira cómica número 41 de la serie *The Upside Downs*, del dibujante Gustave Verbeek, publicada el 31 de julio de 1904 en el *New York Herald*. Al llegar a la sexta viñeta, la historia continúa girando la tira 180 grados.

forman también un número. Como 68086, que, girado, se lee 98089.

El equivalente en palabras se denomina palíndromo vertical, o ambigrama. Este último término se emplea asimismo para las imágenes que tienen sentido tanto del derecho como del revés, como ocurre con las célebres caras reversibles del artista inglés Rex Whistler.

¿Podrían utilizarse ambigramas para crear un cómic? Gustave Verbeek dibujó *The Upside Downs* para el *New York Herald* entre los años 1903 y 1905. Cada tira cómica, como la que acompaña a esta columna, constaba de seis viñetas-ambigrama. Al finalizar la sexta, la historieta continuaba girando 180 grados la tira. Mágicamente aparecían entonces seis nuevas viñetas que completaban la narración. Verbeek realizó 64 de estas extraordinarias tiras cómicas.

Ailifilia en las salas

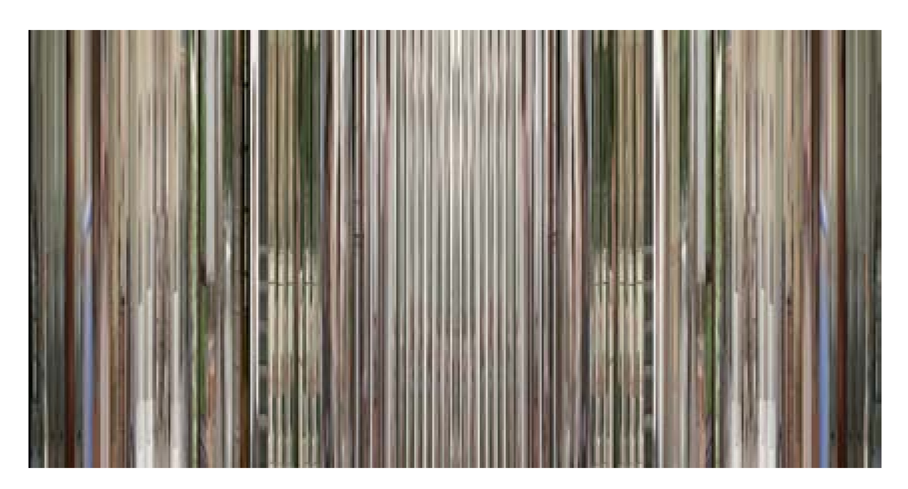
Más difícil todavía: ¿hay algo semejante en cine? Hasta hace poco disponíamos tan solo de insinuaciones palíndromas, como el vídeo musical de Michel Gondry *Sugar water* (1996). Más recientemente, *Palíndromo* (2001), de Philippe Barcinski, o *HANNAH* (2005), de Samuel Kiehoon Lee, se han acercado mucho a lo que parecía imposible. Pero, sin duda, *Symmetry: A palindromic film* (2013) se lleva la palma.

Symmetry, un cortometraje de poco más de 7 minutos realizado por el francés Yann Pineill, es un auténtico palíndromo audiovisual construido a partir de un bifronte. Un bifronte es una palabra o frase que tiene sentidos distintos al leerse al derecho y al revés, como *La tele ves,* que dada la vuelta se convierte en *Se ve letal*. Es fácil, a partir de ellos, construir frases palíndromas: basta con colocar una conjunción en medio de ambas versiones. En nuestro caso, *La tele ves y se ve letal*.

Como explica el propio Pineill: «Esta película ha sido escrita de forma simétrica: la segunda mitad es estrictamente igual que la primera, pero pasada al revés y reflejada. La segunda parte no actúa como un simple rebobinado, sino como continuación de la primera». Para convencerles de la veracidad de la afirmación, he utilizado una curiosa herramienta informática denominada Movie Barcode Generator, creada por Melvyn Laïly.

Este programa convierte una película completa en una sola imagen similar a un código de barras. Tras alimentar el programa con un film, se nos pide el número de fotogramas que deseamos colocar en cada línea vertical. En este caso he empleado cien. Eso significa que cada línea de la imagen resultante incluye cien fotogramas comprimidos a la anchura de un píxel y colocados en vertical. Si observa la imagen que reproducimos en la página siguiente, comprobará de un vistazo que la película guarda una simetría perfecta con respecto al eje central.

El cortometraje se encuentra preñado de pequeños detalles que harán las deli-



COMPRESIÓN de todos los fotogramas del cortometraje *Symmetry* en una sola imagen realizada con el programa Movie Barcode Generator, de Melvyn Laïly (accesible en arcanesanctum.net/movie-barcode-generator). La imagen muestra una clara simetría especular a lo largo del eje horizontal.

cias de los ailifílicos. «Explora todo tipo de simetrías: composiciones, formas, sonidos y música, escenarios, colores, acciones, tiempo...», en palabras de su director. Así que les propongo visionar el corto en Vimeo antes de seguir leyendo, porque a partir de aquí voy a destripar algunas de sus sorpresas.

Symmetry comienza con un amanecer. La luz del sol entra en un salón por la derecha de la imagen y va ascendiendo. Después se nos muestra una casa a través de secuencias de sus distintas habitaciones, donde muebles y objetos de decoración se presentan como bodegones de composición simétrica. Despertando en una cama aparece la pareja protagonista, formada por los hermanos en la vida real Edouard Sanville y Daphné Sanville. Vemos entonces la hora en un reloj digital. Son las 05:05 de la mañana.

Tras desayunar, la pareja discute y rompe. Edouard se marcha de casa y, tras vagar por la ciudad, encuentra en un vagón de metro al tercer personaje de la historia, la actriz Romane Pineill, quien le invita a subir a su casa. En el ínterin, Edouard recibe una llamada que no contestará. Sabemos que se trata de su chica porque vemos su fotografía en la pantalla del móvil, la cual aparece junto a su nombre: ANNA. Cómo no, palíndromo.

Ya en casa de Romane asistimos a la mejor escena del cortometraje. Edouard, frente a un espejo, enciende una radio. Suena una voz extraña: se trata de una locución en inglés, pero invertida. El protagonista gira entonces el dial para encontrar una emisión comprensible y se topa con una pieza de música clásica. De repente, en un homenaje a la *Alicia* de Carroll, la cámara pasa al otro lado del espejo y vemos exactamente la misma imagen pero invertida especularmente. La música clásica sigue sonando bien. El protagonista vuelve a tocar el dial y ahora sí que entendemos a la locutora, que dice: «¿Por qué es el pasado diferente del futuro? Debido a que las leyes de la física son simétricas temporalmente, si los relojes fueran hacia atrás en el tiempo, en lugar de...».

¿Qué ha ocurrido? ¿Por qué la música no parece haber sufrido la misma alteración? Los palíndromos fonéticos son muy raros y cortos (otro cantar, y nunca mejor dicho, son los bifrontes fonéticos, que tuvieron su época dorada con los mensajes satánicos ocultos en los discos de baquelita tocados al revés), así que el director optó por hacer que nos fijemos en la flecha temporal a partir de la voz de la locutora. Gracias a ella, descubrimos que el tiempo transcurre ahora hacia atrás.

¿Y la música clásica, que sigue sonando bien? Sorpresa: se trata de la Sinfonía número 47 en sol mayor de Joseph Haydn, conocida como *El palíndromo*, donde, al igual que en el film, la segunda parte de la obra es la misma que la primera pero ejecutada al revés.

Los músicos han explorado extensamente la retrogradación, los palíndromos musicales y sus variantes. Probablemente, la pieza más célebre en este sentido sea el *Canon del cangrejo*, de Johann Sebastian Bach. Busquen en YouTube el vídeo de Jos Leys y Xantox sobre el *Canon del cangrejo* escrito en una banda de Möbius. No les decepcionará, aunque sean aibofóbicos. Y, si tienen más interés, curioseen nombres como Anton Webern, Karlheinz Stockhausen o Karel Goeyvaerts. Por cierto, la banda sonora del cortometraje, debida a Cliff Martinez, puede también reproducirse hacia delante y hacia atrás, como de hecho ocurre en la película.

A partir del cruce del espejo asistimos de nuevo a la misma historia que ya hemos visto, pero invertida en el tiempo y reflejada especularmente (por ejemplo, ahora veremos AИИA en el teléfono móvil). Sin embargo, esta segunda parte del bifronte audiovisual tiene un significado totalmente distinto. Pineill nos apunta de dónde le viene la inspiración: «Hay un tipo de simetría que se denomina quiral. Ocurre cuando dos cosas son la imagen especular una de otra (las manos, por ejemplo, son las mismas pero no se pueden superponer). En química, las moléculas quirales se componen de los mismos átomos pero organizados de forma simétrica unos con respecto a otros. Y esas moléculas tienen funciones completamente distintas».

Las moléculas quirales de su película son los gestos de sus actores hacia adelante y hacia atrás. El afamado teórico del cine Lev Kuleshov demostró, prácticamente en los inicios de este arte, que mediante la edición y el montaje resulta posible dar a un rostro neutral el sentimiento que deseemos. El efecto Kuleshov es el truco empleado por Pineill para convertir lo que antes era una ruptura en una reconciliación.

El cortometraje acaba con un atardecer en la casa. La luz del sol entra en el salón por la izquierda de la imagen y va descendiendo. Ahora el reloj digital muestra las 20:20 y nuestros protagonistas regresan a la cama tras haber superado una crisis de pareja.

Genial, ¿no? *Symmetry* es una película matemáticamente impresionante. Y si tuviera que resumírsela a alguien en una sola frase, le diría: *Sé verla al revés*.

PARA SABER MÁS

Manual d'enigmística. Màrius Serra. Columna Edicions, 1991.

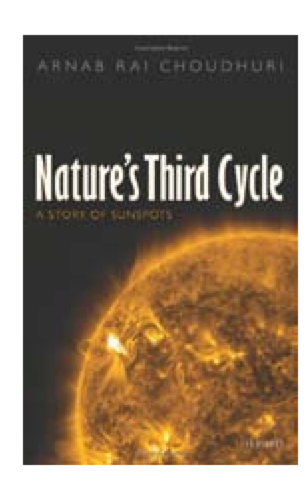
Pluma, pincel y batuta: Las tres envidias del matemático. Piergiorgio Odifredi. Alianza Editorial, 2007.

Numerical palindromes and the 196 problem. Yutaka Nishiyama en *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, vol. 80, n.º 3, págs. 375-384, 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

Caligrafías, reinas y culebras. Martin Gardner en *IyC*, agosto de 1981.

CORTESÍA DEL AUTOR



NATURE'S THIRD CYCLE.
A STORY OF SUNSPOTS

Por Arnab Rai Choudhuri. Oxford University Press, Oxford, 2015.

La actividad del Sol

Manchas, dinamos y ciclos solares

La empresa científica dedicada a investigar la estructura y actividad del Sol presenta, para sus protagonistas, retos continuos cuya superación ha ido transformando la misma física general. Ha ido de la mano de los progresos de la técnica, que han permitido tomar imágenes espectaculares de los fenómenos solares. *Nature's third cycle*, escrito en clave autobiográfica, transporta al lector desde los primeros descubrimientos hasta los últimos resultados del ciclo magnético de actividad solar. Arnab Rai Choudhuri, su autor, es catedrático de física del Instituto Indio de la Ciencia. Estudió con dos gigantes de la astrofísica teórica, Subrahmanyan Chandrasekhar, quien recibió el Nobel en 1983 por predecir la formación de los agujeros negros, y Eugene Newman Parker, supervisor de su tesis doctoral defendida en la Universidad de Chicago. Choudhuri, uno de los creadores del modelo de dinamo de transporte de flujo, ha escrito también dos manuales hoy clásicos: *The physics of fluids and plasmas* y *Astrophysics for physicists*.

En torno a los dos primeros ciclos de la naturaleza, el ciclo del día y la noche (diurno) y el ciclo de las estaciones (anual), se organiza la actividad humana. Puede decirse que la civilización comenzó cuando nuestros antepasados se percataron del curso de las estaciones. Empezaron a saber cuándo sembrar y cuándo cosechar. No solo el hombre; hasta los animales inferiores son sensibles a los ciclos circadianos. Las manchas solares, el tercer ciclo natural, dibujan trazos oscuros sobre la superficie del Sol. Su incidencia varía en un ciclo que se atiene a un período medio de once años. Cabría mencionar un cuarto ciclo, el de las fases lunares, carente de especial interés en un mundo cosmopolita, que sigue regulando prácticas y hábitos de religiones como el islamismo y el hinduismo.

El Sol ejerce una influencia determinante sobre el clima y el entorno espacial de la Tierra. En condiciones normales, los rayos solares calientan adecuadamente nuestro planeta azul, propiciando agua en forma líquida en buena parte de la superficie terrestre y posibilitando que la vida anime en miríadas de formas. Ese calentamiento suave procede de un flujo incesante de energía solar, que, por lo que sabemos, ha permanecido constante sobre la Tierra a lo largo de períodos geológicos. Ahora bien, cuando el astro experimenta un episodio particularmente intenso de manchas solares, se hacen más frecuentes las violentas tormentas que agitan grandes masas de plasma magnético hacia la Tierra; su repercusión sobre un mundo que depende del buen funcionamiento de la técnica es bien conocida [*véase* «Sorpresas en los cinturones de Van Allen», por Daniel N. Baker; Investigación y Ciencia, diciembre de 2015].

El fenómeno posee una larga historia cultural. Recogen las crónicas medievales que, en el año 814, se observó una ingente mancha solar antes de la muerte del emperador Carlomagno, presagio, se pensó, de la inminencia de la misma. En realidad, las manchas solares habían sido estudiadas en China y Corea desde hace unos 2000 años, asociadas también a avatares del emperador.

En torno a 1610, Galileo Galilei, Christoph Scheiner, Johannes Fabricius y Thomas Harriot comenzaron las observaciones sistemáticas de las manchas con sus telescopios rudimentarios. Fue Galileo quien formuló las propuestas más sagaces, comprobado que cambiaban de sitio de un día a otro. De ello Galileo extrajo la conclusión acertada de que debían ser marcas sobre la superficie solar; variaban su posición en virtud de la rotación del Sol sobre su propio eje. Dedujo que el período de rotación del Sol era de 27 días. Había comenzado la física solar.

En 1795, William Herschel, descubridor de Urano, se esforzó en hilvanar una explicación de las manchas. Creía que el Sol tenía una superficie fría rodeada por nubes radiantes de calor. Las nubes se hallarían tan densamente empaquetadas en la atmósfera solar que solo nos dejarían ver la punta apical de las mismas; en ciertas ocasiones se producirían hiatos entre nubes que pondrían al descubierto el interior frío. Para Herschel, las manchas solares serían justamente esos hiatos entre nubes.

Pasado medio siglo, en 1844, Heinrich Schwabe (1789-1875), boticario de Dessau, descubrió el ciclo de manchas solares. Tras procurarse un pequeño telescopio en 1826, observó diariamente el astro con el fin de anotar el paso de cualquier planeta más cercano al Sol que Mercurio. De existir un planeta así, Schwabe esperaba divisarlo delante del Sol, a modo de lunar sobre el disco solar. Se habían observado tránsitos de ese tipo de Mercurio y Venus. Mientras se afanaba en tal empeño, Schwabe realizó un registro de las manchas solares que aparecían. Al comienzo de sus registros eran numerosas. En 1828 contabilizó 225. Esa cifra bajó en los años siguientes hasta caer a 33 en 1833. Y de nuevo volvían a emerger para ir desapareciendo. En 1844, Schwabe llegó a la conclusión de que había descubierto un ciclo periódico de manchas solares. Estimó el ciclo en diez años. Sabemos hoy que no todos los ciclos son de igual longitud. Los hay de más de once años y otros más breves.

A través de las manchas, Richard Carrington llegó, en 1859, al descubrimiento de las fulguraciones solares. Tras el ciclo de las manchas se esconden numerosos fenómenos del astro. Las fulguraciones solares son explosiones que duran pocos minutos y liberan una energía que es miles de millones de veces la energía de la bomba atómica arrojada sobre Hiroshima. Tales fulguraciones se cuentan, sin duda, entre los fenómenos más violentos del sistema solar. Suelen darse por encima de las grandes manchas solares. Una gran mancha solar vive unos diez días antes de desintegrarse y desaparecer. Se supone que la difusión turbulenta en la zona de convección del Sol dispersa el campo magnético de la mancha solar. Para observar manchas espectaculares no necesitamos servirnos del telescopio; se

distinguen a simple vista, cuando el Sol se encuentra cerca del horizonte, inmediatamente después del orto o antes del ocaso. El campo magnético terrestre aporta una suerte de escudo protector frente a los efectos de alteraciones solares súbitas. Este escudo protector es más débil cerca de los polos geomagnéticos.

Un siglo después de la identificación del ciclo de manchas solares, la causa del mismo seguía envuelta en el misterio. Pero en 1908 se descubrieron poderosos campos magnéticos en las manchas solares, lo que vinculó ese ciclo de once años a la actividad magnética del Sol. Solo con los grandes avances en física de plasmas, alcanzados en los últimos decenios, se ha podido tejer una teoría coherente sobre el origen del ciclo y entender las repercusiones de las grandes explosiones solares sobre la Tierra. En efecto, en ese año de 1908, George Ellery Hale (1868-1938) descubrió que las manchas solares eran regiones de un campo magnético intenso. Diez años antes (en 1897), Pieter Zeeman había establecido la existencia de múltiples líneas en el espectro óptico donde solo aparecía una línea en ausencia de campo magnético. Hale se percató de que el espectro de una gran mancha solar manifestaba ese desdoblamiento de líneas espectrales. Y llegó a la conclusión de que una mancha solar era una región de un intenso campo magnético. El campo magnético de una mancha solar grande puede multiplicar por cinco mil la intensidad del campo magnético existente alrededor del polo geomagnético de la superficie de la Tierra.

El descubrimiento de Hale, de la existencia de campos magnéticos en las manchas solares, resultó de la máxima importancia para la física, pues se trataba de la primera vez que se reconocía la presencia de campos magnéticos fuera de la Tierra. Los campos magnéticos se hallan ubicuos por todo el universo. Con el descubrimiento de Hale quedó claro que el ciclo de once años de las manchas solares no era otra cosa que un ciclo magnético del Sol. Gracias al empleo del carbono 14 y el berilio 10, podemos retrotraer los registros de manchas milenios atrás, antes de la propia aparición de la civilización humana.

En 1955, Eugene Parker mostró que las ecuaciones de la magnetohidrodinámica permitían la existencia de una dinamo de fluido autoexcitada. Pergeñó las ecuaciones de dinamo que permitían explicar numerosos aspectos del campo magnético solar, incluido el ciclo de once años, hasta entonces un misterio irresoluble. (En 1958 Parker desarrolló la teoría del viento solar. Trabajando con las ecuaciones básicas de mecánica de fluidos, halló que las altas temperaturas de la corona solar debían causar un viento continuo de gas caliente que arrancaba del Sol y soplaba por todo el sistema solar. A los pocos años, las mediciones tomadas por satélites confirmaron brillantemente su teoría. Mientras que la luz tarda, desde el Sol, ocho minutos en llegar a la Tierra, el viento solar tarda unos tres días en cubrir la distancia del Sol a la Tierra, que es lo que tarda una fulguración solar en afectar a nuestro planeta; observación que plantea la intrigante sugerencia de que los residuos de una fulguración solar pudieran ser transportados a la Tierra por el viento solar.) [*Véase* «Campos magnéticos en el cosmos», por Eugene N. Parker; Investigación y Ciencia, octubre de 1983.]

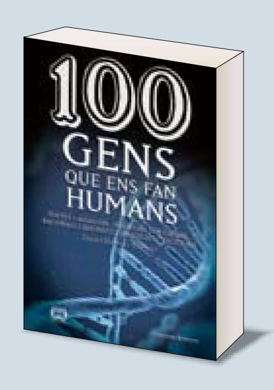
Las manchas solares son lugares de intensos campos magnéticos, generados por una acción de dinamo en el interior solar y con propiedades sistemáticas que se invierten de un ciclo al siguiente. En la modelización del proceso de dinamo que genera la actividad cíclica en el Sol y en otras estrellas distinguimos dos tipos críticos de componentes del campo

NOVEDADES



PROTAGONISTAS DE LA CIENCIA: VEINTE CONVERSACIONES CON CIENTÍFICOS

Dirigido por Mónica Lara y Pilar Tigeras Sánchez
CSIC, 2015
ISBN 978-84-00-10012-4
247 págs. (18 €)



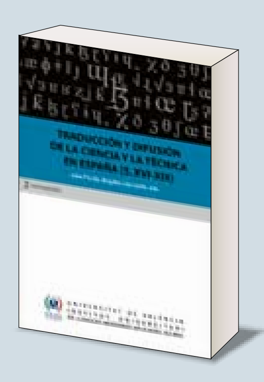
100 GENS QUE ENS FAN HUMANS

David Bueno Torrens
Cossetània Edicions, 2015
ISBN 978-84-9034-354-8
224 págs. (14.90 €)



VENENOS, CIENCIA Y JUSTICIA. MATEU ORFILA Y SU EPISTOLARIO (1816-1853)

José Ramón Bertomeu Sánchez
Universidad de Alicante, 2015
ISBN 978-84-9717-396-4
560 págs. (30 €)



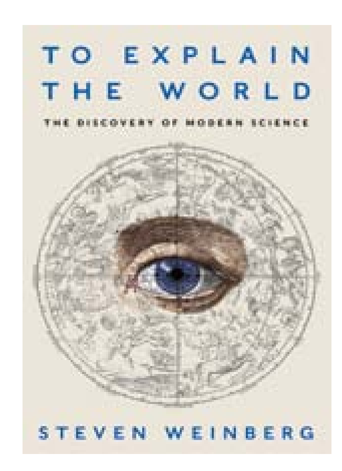
TRADUCCIÓN Y DIFUSIÓN DE LA CIENCIA Y LA TÉCNICA EN ESPANA (SIGLOS XVI-XIX)

Dirigido por Julia Pinilla y Brigitte Lépinette
Universidad de Valencia, 2015
ISBN 978-84-370-9686-5
470 págs. (22 €)

magnético: uno es el campo toroidal, que gira azimultamente alrededor del eje de rotación; el otro es el campo poloidal, que, en su forma más elemental, es el de un dipolo magnético alineado con el eje de rotación y produce un campo que recuerda al de una barra magnética oscilatoria. Las variaciones de la velocidad rotacional pueden generar campos toroidales a partir de campos poloidales; la generación de un campo poloidal inverso a partir de un campo toroidal es mucho más sutil. A estos procesos, descritos por Parker, Choudhuri los llamó dogma central del ciclo solar.

Choudhuri y su grupo han descrito la creación de bucles aislados de flujo magnético en el interior profundo del Sol, la interacción de los mismos con la rotación a medida que ascienden a la superficie y su emergencia para formar manchas solares. En ese cuadro, esos campos de superficie se distorsionan progresivamente para crear un campo poloidal inverso, que se transporta luego hacia los polos y hacia abajo, hacia capas más profundas donde puede generarse un campo toroidal inverso. Aunque este proceso sigue siendo objeto de debate, Choudhuri logró un triunfo al predecir con precisión que el ciclo solar de su tiempo sería mucho más débil que sus predecesores inmediatos.

—*Luis Alonso*



TO EXPLAIN THE WORLD:
THE DISCOVERY OF MODERN SCIENCE

Steven Weinberg. Allen Lane/Harper Collins, 2015.

Una historia sin sombreado

La mirada radical sobre la historia de la ciencia

To explain the world, el nuevo libro del nóbel de física Steven Weinberg, no dejará indiferentes a los historiadores profesionales de la ciencia. Está basado en las clases de historia de la ciencia que Weinberg imparte en la Universidad de Austin, Texas. Pero el autor señala de entrada que él es «físico, no historiador». No le preocupa juzgar la ciencia del pasado desde el punto de vista del presente y fustiga a los investigadores que consideran la ciencia como un producto histórico o cultural. Weinberg centra su atención casi exclusivamente en la ciencia occidental, incluyendo la ciencia del islam medieval. Aunque reconoce que otras civilizaciones generaron también conocimiento científico, Weinberg cree que el método científico —esa técnica especial que nos permite «aprender cosas fiables sobre el mundo»— fue descubierto e inicialmente explotado en Occidente.

El resultado es singular y provocador, como una historia de la arquitectura que juzgara los edificios por su adecuación a las necesidades y los códigos constructivos actuales. Weinberg menoscaba algunas de las luminarias del panteón de la historia de la ciencia, como el filósofo René Descartes y el pionero del empirismo Francis Bacon, y ensalza a otras, como Aristarco de Samos, precursor del heliocentrismo en la Antigüedad, o el químico Robert Boyle, temprano exponente de «un nuevo y agresivo estilo de física experimental».

El libro trata de forma muy competente los sistemas astronómicos y mecánicos de Nicolás Copérnico o Isaac Newton. Incluye también un centenar de páginas muy valiosas con notas técnicas sobre mecánica, óptica y astronomía en los orígenes de la ciencia moderna, en las que, por ejemplo, se deduce la ley de refracción o se da cuenta de las matemáticas de las órbitas planetarias.

Weinberg es un escritor sabio e ingenioso, como ya demostró en *Los tres primeros minutos del universo* (1977), un clásico de la divulgación. Así describe en *To explain the world* el rechazo a la ciencia aristotélica en la Universidad de París en el siglo XIII: «Si la condena salvó a la ciencia del aristotelismo dogmático, su levantamiento la salvó del cristianismo dogmático». Con frecuencia ilustra sus conclusiones históricas con ejemplos del siglo XX. Sobre Copérnico observa que «una teoría bella y simple que concuerda bien con las observaciones suele estar más cerca de la verdad que una teoría fea y complicada que concuerda mejor con ellas», y lo argumenta con un ejemplo de la historia de la mecánica cuántica, el método de Erwin Schrödinger para calcular los estados de energía del átomo de hidrógeno. De modo análogo, compara los esfuerzos del sabio persa del siglo XI al-Biruni por calcular el radio de la Tierra con una precisión injustificada, con su propia experiencia como aprendiz de físico calculando valores del campo magnético hasta ocho decimales que no aportaban nada.

Este enfoque presenta sus problemas. Bacon y Descartes se equivocaron con frecuencia, pero defendieron a la ciencia moderna cuando daba sus primeros pasos y contribuyeron a hacer de ella una actividad útil e inteligible, creando un nicho cultural para la profesión de Weinberg. Solo cabe despreciar estos logros desde una concepción muy limitada de la historia de la ciencia.

Weinberg reconoce que se encuentra más cómodo con la física a partir del siglo XVII, una vez se impuso el método científico. Su incomodidad con períodos anteriores le impide a veces apreciar el contexto de una figura o una afirmación. Uno de los casos más llamativos es el de Sócrates, de quien afirma que «no se interesaba demasiado por la ciencia natural». Esta afirmación se sustenta en un pasaje del *Fedón* de Platón, en el que el filósofo critica a su predecesor Anaxágoras por describir los cuerpos celestes «en términos puramente físicos, sin tener en cuenta cuál es el mejor». Solo que la historia es más compleja. Sócrates afirma en el *Fedón* que había suscrito la idea de Anaxágoras de un universo regido por una mente divina, pero acabó rechazándola porque no podía explicar por qué o cómo la mecánica del cosmos son la elección inevitable de una mente que, en último término, no podemos conocer. Por eso desarrolló su propio método de investigación, empezando por contrastar la hipótesis más plausible.

De modo que Weinberg cita a Sócrates como si suscribiera una postura que había rechazado explícitamente. Y aunque términos como hipótesis y lógica, fundamentales para Sócrates, no signifiquen para nosotros lo mismo que significaban para los griegos, el filósofo estaba promoviendo un método que a Weinberg se le escapa. Este método abierto e hipotético de investigación no se basaba en la pura razón ni el conocimiento divino, y recurría a las matemáticas. Muchos historiadores ven en él una formulación inicial del método científico.

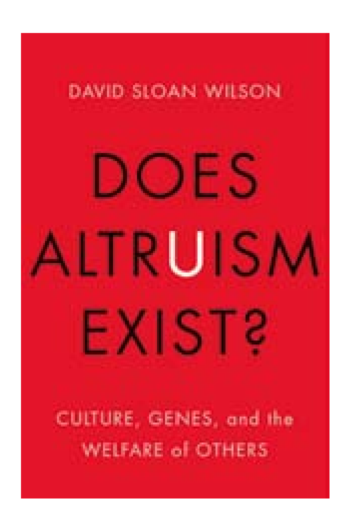
Weinberg abre *To explain the world* con una cita del poema de John Donne *Discurso sobre la sombra*. Dos amantes conversan por la mañana; sus sombras se acortan gradualmente, hasta que desaparecen cuando el Sol pasa sobre sus cabezas. La última línea de la cita de Weinberg dice así: «Todas las cosas se reducen a la audaz claridad». El libro concluye con una exaltación del reduccionismo como el sendero correcto de la ciencia, capaz de explicar «por qué el mundo es como es».

El enfoque reduccionista ilumina elementos del pasado, entre ellos aspectos fundamentales de los primeros modelos astronómicos y ópticos. Weinberg manifiesta asimismo una percepción más profunda e intuitiva de las prácticas científicas que muchos historiadores y filósofos. «No aprendemos a hacer ciencia siguiendo un conjunto de normas, sino a partir de la experiencia de hacer ciencia, llevados por el deseo y el placer que nos da llegar a explicar algo.» Aun así, a veces conviene ver el sombreado, el encaje de algo en su entorno, para verlo tal y como es.

—Robert P. Crease
Universidad Stony Brook de Nueva York

Reseña original publicada en *Nature*, vol. 518, pág. 300, 2015. Traducida con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2015

Con la colaboración de nature



DOES ALTRUISM EXIST? CULTURE, GENES, AND THE WELFARE OF OTHERS

David Sloan Wilson. Yale University Press-Templeton Press, New Haven, 2015.

Altruismo

Una perspectiva evolutiva

Cuestión secularmente central en el dominio de la filosofía —recuérdense las disputas sobre la bondad innata del buen salvaje o sobre su contrario, encerrado en la sentencia *Homo homini lupus* («el hombre es un lobo para el hombre»)—, el altruismo ha pasado a ser hoy objeto de atención en diversas ramas de la biología. ¿Existe un altruismo natural entre los seres vivos? se preguntan por igual el etólogo, el genético o el neurobiólogo. David Sloan Wilson, uno de los teóricos de la evolución más prestigiosos de nuestros días, ha dedicado buena parte de su carrera académica al altruismo, desde su primer trabajo publicado sobre selección de grupo [*véase* «Evolución “por el bien del grupo”», por David Sloan Wilson y Edward O. Wilson; Investigación y Ciencia, enero de 2009] hasta sus más recientes investigaciones sobre la incidencia del mismo en la vida diaria (política, economía y finanzas), iniciadas en 2006.

Desde un punto de vista evolutivo, el altruismo se encuentra intrínsecamente vinculado a la organización funcional de los grupos. En la naturaleza y en la sociedad humana descubrimos grupos activos. Existen grupos que funcionan como organismos, igual que hay organismos evolucionados a partir de grupos. La constitución de los grupos funcionalmente organizados arroja nueva luz sobre el altruismo. Pero este no agota nuestra comprensión de la conducta social. Tampoco parece que, por sí misma, la altruista tenga que ser una conducta buena; de hecho, puede comportar consecuencias patológicas. Los humanos constituyen una de las especies más «grupales» de la Tierra, equiparable en cierto sentido a las colonias de insectos sociales y organismos multicelulares. La razón de que el altruismo se adquiriese en las especies sociales parece fácil de establecer. Pero las implicaciones para la sociedad humana se hallan lejos de resultar obvias.

El término «altruismo» no aparece hasta 1851, cuando fue acuñado por el filósofo francés Auguste Comte como antónimo de egoísmo. Se llama altruismo a la preocupación por el bienestar de los otros como fin en sí mismo. La mejora del bienestar de los otros requiere a veces un coste en términos de tiempo, placer, energía y riesgo. Esa acción intencional en beneficio de los demás entraña la posibilidad de recortar los propios intereses.

Una idea muy arraigada de nuestro tiempo es que la evolución explicaría el comportamiento de aves, bacterias o abejas, pero cuando se llega a la especie humana apenas si se trascienden urgencias básicas (comida, sexualidad). La pregunta sobre si existe el altruismo referido a humanos demanda una consideración específica. Por fortuna, el progreso experimentado en los últimos decenios nos permite enhebrar un relato sobre la evolución humana que hace justicia a nuestra peculiaridad conductual y cultural. [*Véase* «Raíces del espíritu cooperativo», por Frans B. M. De Waal; Investigación y Ciencia, noviembre de 2014.]

La idea de que el altruismo no existe cuenta con una larga tradición en el pensamiento filosófico, político, económico y biológico. Quienes ponen en cuestión su existencia no niegan que se den actos altruistas, pero la pregunta es si tal conducta se asienta en motivos o razones altruistas. Algunos egoístas empedernidos pueden ayudar a otros como un medio para alcanzar sus propios fines egoístas, pero no se califican de altruistas porque el fin de su acto altruista no termina en él. Algunos oponentes aducen mecanismos cerebrales para explicar la razón última del altruismo. La recompensa neurológica es, afirman, lo que buscamos cuando realizamos actos altruistas. Quienes hacen el

bien son adictos a las drogas liberadas en nuestro cerebro. Lo hacen por placer, aun cuando no seamos conscientes de ello. En ello no hay nada malo, por supuesto. Lo único malo es que lo que ellos creen hacer en pro del bien ajeno es en realidad en pro del placer neurológico propio que comporta. En cambio, a la pregunta de si existe el altruismo, el autor responde: cuando el altruismo se define en términos de acción y de eficacia biológica relativa y entre grupos, se dará allí donde se alcance una organización funcional de grupo.

En los años setenta del siglo pasado, Lynn Margulis negaba que las células eucariotas hubieran evolucionado a través de mutaciones registradas en células bacterianas, procariotas; antes bien, surgieron de la asociación simbionte de bacterias que quedaron así funcionalmente integradas y formaron organismos de alto nivel. Los teóricos de la evolución John Maynard Smith y Eors Szathmary generalizaron ese concepto para explicar otras transiciones de grupos de organismos, incluidas las primeras células bacterianas, organismos multicelulares, colonias de insectos sociales, evolución humana y quizás el propio origen de la vida como grupos de interacciones moleculares funcionalmente organizadas. El equilibrio entre niveles de selección no es estático, sino dinámico; puede evolucionar por sí mismo. Las grandes transiciones evolutivas se caracterizan por ser acontecimientos raros en la historia de la vida y de gran alcance.

Parecería que el altruismo lanza una sólida objeción contra el núcleo central de la evolución darwinista. Resulta difícil explicar ese comportamiento generoso como producto de la selección natural. Si la selección natural privilegia caracteres que promuevan la supervivencia de los individuos y su reproducción, y si los actos altruistas aumentan la supervivencia y reproducción de los otros a costa del altruista, ¿cómo van a adquirirse por evolución los caracteres altruistas? Esta cuestión se ha venido debatiendo desde Darwin hasta nuestros días. Las ideas básicas sobre el altruismo se difundieron por autores anteriores o contemporáneos de Darwin.

Para resolver esa aporía, Wilson comienza por distinguir dos significados en el término altruista. El primero se refiere a cómo actúan las personas. El altruismo se manifestaría, por ejemplo, en la desaparición de la división entre naciones ricas y pobres, la gestión de sus asuntos por la mayor parte de la humanidad para evitar el calentamiento global y la contaminación de los mares y ríos. El segundo significado de altruismo remite a los pensamientos y sentimientos que causan que las personas actúen como actúan. Unos sentimientos y pensamientos se orientan al bienestar de los demás y de la sociedad entera, mientras que otros están orientados hacia uno mismo. En las relaciones de uno con muchos, nuestra preferencia por determinados pensamientos y sentimientos se basa en los actos que producen.

Observado en el plano de la acción, el altruismo guarda una estrecha relación con la organización funcional de grupo. Algo está funcionalmente organizado cuando sus partes operan conjuntamente de una manera coordinada para alcanzar un fin. La razón de que las personas necesiten aportar servicios para los demás se debe a que somos especies sociales y se requiere ayuda mutua para acometer juntos lo que no podemos emprender por separado. La lista de actividades que requerían ayuda mutua antes del advenimiento de la agricultura incluía el cuidado de la progenie, caza y recolección, defensa contra depredadores y agresores, así como ataque a otros grupos humanos. La agricultura condujo a un ciclo autocatalítico entre la producción de recursos y sociedades más extensas con división del trabajo. Hoy unos dependemos de otros hasta el punto de que no podríamos sobrevivir por nosotros mismos, igual que una hormiga separada de la colonia. Los orgánulos de una célula y los órganos de un organismo multicelular son milagros de organización funcional diseñados por selección natural para reforzar la supervivencia y la reproducción.

Se requiere una explicación evolutiva para dar cuenta del funcionamiento organizado de una colonia. Con su reina y sus obreras. Se requiere una explicación evolutiva para explicar también los grupos humanos, funcionalmente organizados. El caso humano reviste mayor complejidad, porque hay que añadir el componente cultural a la evolución genética. En las dos situaciones, sin embargo, la explicación descansa sobre principios comunes: la selección natural se basa en la eficacia biológica, la forma de procurar el bienestar del grupo no maximiza la eficacia biológica de los individuos integrantes y la organización funcional del grupo en cuanto tal se adquirió evolutivamente por selección natural entre grupos. En efecto, no importa cuán bien un organismo sobrevive y se reproduce, sino que lo haga mejor que el resto de los organismos en la población en cuestión. La existencia de múltiples grupos y de variación entre grupos suministra las diferencias de adaptación y eficacia biológica requeridas por la selección natural para favorecer un tipo sobre otros. El egoísmo puede ganar al altruismo en el interior de un grupo. Pero también grupos altruistas pueden vencer a grupos egoístas. El resultado dependerá del equilibrio entre esos dos niveles de selección antagónicos.

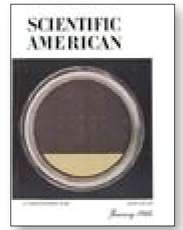
Charles Darwin apreció el problema fundamental de la vida social que hace difícil explicar de qué forma el altruismo y otros valores morales evolucionaron sobre la base de la selección entre individuos dentro de un mismo grupo. Y vio también la solución en un pasaje clásico del *The descent of man*: «No debe olvidarse que, aunque un elevado nivel de moralidad aporta escasa ventaja, si alguna, a cada hombre y a su progenie sobre otros hombres de su misma tribu, un incremento en el número de hombres cabales y un avance en el nivel moral aportará sin duda una inmensa ventaja de una tribu sobre otra. Una tribu que incluyera muchos miembros que, por poseer un elevado grado de espíritu de patriotismo, lealtad, obediencia, coraje y compasión, se hallaran siempre prestos a ayudarse mutuamente y a sacrificarse por el bien común, vencería sobre la mayoría de las demás tribus, y ello sería selección natural. En todo el mundo y a través de los siglos, unas tribus han suplantado a otras. Y, puesto que la moralidad constituye un elemento importante en su éxito, el nivel moral y el número de hombres cabales tiende a crecer por doquier».

Darwin se encontraba en el buen camino, pero los evolucionistas tardaron tiempo en percatarse. Lo que desde una perspectiva pudiera considerarse altruista, desde otra era egoísmo. Sobre ese antagonismo aparente, que se dio en llamar problema de equivalencia, se desató una controversia, basada en la selección de grupo. Para aludir a la evolución del altruismo sin invocar la selección de grupo se desarrollaron la tesis de la selección de parentesco, el modelo del gen egoísta y la teoría evolutiva de juegos.

Esas teorías transformaban altruismo en egoísmo. El auxilio de un pariente a otro se convirtió en ayuda individual a sus genes en el cuerpo de otro, maximizando por tanto su «eficacia biológica inclusiva». En particular, la teoría del gen egoísta realizaba la transmutación última de considerar egoísta toda evolución genética. Bajo ese parámetro, cualquier cooperación no sería más que una mezcla de oportunismo y explotación; toda beneficencia, hipocresía redomada.

—Luis Alonso

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Enero 1966

Comunicaciones por láser

«El anuncio en 1960 de la creación de un modelo de láser operativo fue acogido con entusiasmo por los trabajadores de numerosas especialidades. Puesto que la luz producida por un láser es a la vez coherente y monocromática, se creyó en aquel momento que tal desarrollo era una respuesta a las plegarias de los ingenieros de telecomunicaciones. Aunque todavía deba esperarse a la construcción de un sistema de comunicación por láser a larga distancia realmente funcional y eficaz, el entusiasmo inicial no ha decaído.»

Los japoneses, descubridores de América

«Conforme se han ido conociendo mejor las civilizaciones del Nuevo Mundo, se han observado sorprendentes paralelismos con la arquitectura, las prácticas religiosas y los estilos artísticos de Asia. Se ha sugerido que tales paralelismos son la prueba de unos "descubrimientos" de América sin documentar muy anteriores al de Colón. La mayoría de los arqueólogos profesionales se han mantenido poco convencidos al respecto, dado que no es posible descartar que esos rasgos de semejanza tengan orígenes diferentes. Sin embargo, las investigaciones arqueológicas recientes realizadas en la costa de Ecuador han llevado a una única conclusión: un bote lleno de navegantes de Japón se desvió casualmente hasta las tierras del Nuevo Mundo unos 4500 años antes de que Cortés alcanzara México.»



Enero 1916

Una autopista nacional

«Este año he pasado mis vacaciones haciendo un viaje en automóvil hasta la costa del Pacífico por la autopista Lincoln [construida en 1913]. Hace dos años, al realizar ese mismo viaje, me había apartado mucho de lo común, por ser uno de los acaso cincuenta turistas que seguían el mismo recorrido. Esta primavera no me parece exagerado afirmar que yo no era sino uno de los cinco mil que trataban de llegar a la costa del Pacífico en un vehículo motorizado, y que llegué a ella tras una serie de experiencias que habrían enrojecido de vergüenza, por su falta de imaginación, a cualquier escritor de las populares modernas novelas de misterio. Es la mejor carretera, la única, que lleva desde el Atlántico al Pacífico.»

Algunos tramos de la autopista Lincoln no se pavimentaron hasta la década de 1930.

Automóviles más rápidos

«Uno de los hechos más destacables del año en el campo de la mecánica ha sido la creciente aceptación del auto multicilindro, representado por los de cuatro dobles o los de seis dobles, montados respectivamente en motores de ocho y de doce cilindros. Se habla tanto de las ventajas de los autos milticilindro que no necesitan ponderación; basta con mencionar la suave regularidad de su par motor, la ausencia de vibraciones, la flexibilidad de conducción y la rapidez de aceleración (*véase la ilustración*).»



LOS AUTOMÓVILES se volvieron populares y fiables, y se empleaban cada vez más en carreras deportivas en pistas especialmente construidas para esa actividad en 1916.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXIV, N.º 1, 1 DE ENERO DE 1916



Enero 1866

El gran cometa de 1861

«El señor [Emmanuel] Liais, el célebre astrónomo, presentó unos detallados cálculos demostrativos, fuera de toda duda, de que el 19 de junio de 1861 la Tierra atravesó realmente una de las colas del cometa. El momento del contacto fue las seis horas y veinte minutos de la mañana, hora de Río de Janeiro, y, según las dimensiones de la cola calculadas por el señor Liais, la Tierra debió de haberse introducido por completo en ella ¡durante unas cuatro horas! Esa inmersión en la cola de un cometa no influyó perceptiblemente en el tiempo meteorológico, hecho de veras notable que añade una más a las muchas razones que ya existían para suponer que el material cometario es un millón de veces más tenue que el de nuestra atmósfera.»

En 1880, Heinrich Kreutz calculó en 409 años el período de la órbita del cometa.

Manías

«A veces el género humano es presa de extrañas pasiones. Las monedas tienen un valor de mercado, no hay cuadro que no se venda, por los tulipanes holandeses se pagan barbaridades y últimamente reciben atención los sellos de correos. De todas esas rarezas de la naturaleza humana se aprovechan individuos astutos de mentalidad especulativa deseosos de ganar dinero, honradamente o de otro modo. Algunos grabadores franceses han creído que les valdría la pena diseñar una serie de novedosos sellos de correos hasta entonces nunca vistos. Pretendían haber sido emitidos por la oficina de correos de las islas Sandwich, y como tales fueron ansiosamente adquiridos por unos confiados compradores que posiblemente creerían que nada era lo bastante absurdo para una región como esa. Los falsos sellos hawaianos eran de color naranja, amarillo, verde y de los demás del arco iris.



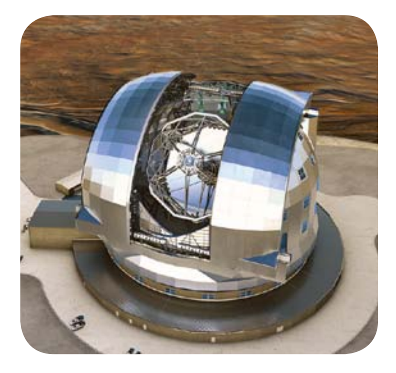
INFORME ESPECIAL: INNOVACIÓN
Ideas que cambian el mundo
VV.AA.

Diez grandes avances para mejorar nuestra vida, transformar la computación y salvar el planeta.

PALEONTOLOGÍA
¿Qué mató a los dinosaurios?
Stephen Brusatte

El impacto del asteroide fue devastador, sobre todo por el momento en que se produjo.





ASTRONOMÍA
Guerra de telescopios
Katie Worth

Viejas rencillas entre tres equipos de astrónomos han amenazado la supervivencia de los mayores y más atrevidos proyectos de astronomía terrestre.

SALUD
El gen de la obesidad
Richard J. Johnson y Peter Andrews

Una mutación genética en nuestros antepasados primates puede ser la causa de la actual pandemia de obesidad y diabetes.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza,
Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón,
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado,
Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Robin Lloyd
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Josh Fischmann,
Seth Fletcher, Christine Gorman, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER,
MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT
Michael Voss

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Carmen Bañuls: *Los límites físicos de la privacidad*; Marián Beltrán: *Una pirámide que cambió la civilización*; Yago Ascasibar: *El Sondeo de la Energía Oscura*; Guzmán Sánchez: *Nanodispositivos para detectar infecciones*; Andrés Martínez: *Apuntes y Cómo adquieren los bebés el lenguaje*; Juan Pedro Campos: *Apuntes y Fraunhofer y el estudio del espectro solar*; Juan Pedro Adrados: *Robots empáticos*; Mercé Piqueras: *Repensar a Darwin*; J. Vilardell: *Anillos de humo y Hace...*; Xavier Roqué: *Una historia sin sombreado*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3
08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España